



**Medición de variaciones espacio - temporales  
de la temperatura del agua en su interacción  
superficie y el subsuelo utilizando redes de  
difracción de Bragg en un tramo de un arroyo  
de montaña colombiano.**

**Oscar Armando Sosa Puerto**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2020



# **Medición de variaciones espacio - temporales de la temperatura del agua en su interacción superficie y el subsuelo utilizando redes de difracción de Bragg en un tramo de un arroyo de montaña colombiano.**

**Oscar Armando Sosa Puerto**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Ingeniería – Ingeniería Electrónica

Director(a):

Gloria Margarita Varón Durán, Ph.D.

Codirector:

Leonardo David Donado Garzón, Ph.D.

Línea de investigación:

Optoelectrónica y comunicaciones ópticas

Grupo de investigación:

Grupo de Investigación en Electrónica de Altas frecuencias y  
Telecomunicaciones (CMUN)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá, Colombia

2020



## **Dedicatoria**

A mis padres Armando Sosa y Dora Puerto, a mi hermano Wilmar Sosa, a mi abuela Rosa Sosa, a la memoria de mis abuelos difuntos, a mi primo Sergio Borda, y a mi amiga Carolina Castellanos.



## Agradecimientos

Primero agradezco a mis padres Armando Sosa y Dora Puerto, y a mi hermano Wilmar Sosa quienes siempre me han dado su apoyo y confianza de manera incondicional en mi desarrollo personal y profesional.

A mi tutora, la profesora Margarita Varón quien me ha dado la oportunidad de trabajar con ella desde cuando yo cursaba mis estudios de pregrado y abrió las puertas de su laboratorio permitiéndome trabajar en este con total autonomía. Sin su tutoría, enseñanzas, paciencia y consejos, no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A mi codirector, el profesor Leonardo Donado, al ingeniero Antonio Preziosi y al grupo de investigación HYDS hydrodynamics of the natural media quienes me dieron la confianza para trabajar en un proyecto de su área y siempre estuvieron prestos a guiar, acompañar y apoyar la interpretación de los resultados de todo el proyecto.

A mi primo Sergio Borda quien más que mi primo ha sido mi amigo. Fue la persona más incondicional desde que el proyecto era tan solo una propuesta hasta el día de su finalización. En especial, agradezco su ayuda en la instalación del prototipo en campo, su apoyo y permanencia durante las 24 horas de medición.

A mis primas Liseth Chaves y Daniela Puerto porque creyeron en mí, me dieron todo su apoyo y siempre tuvieron una palabra de aliento para motivarme a conseguir los objetivos de este trabajo.

A mi querida amiga Carolina Castellanos quien siempre confió y creyó en mí, aun cuando ni yo mismo creía que lo podía conseguir. Ella fue quien me motivó, apoyó y animó a seguir adelante y culminar este trabajo.

A los integrantes del grupo de investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones (CMUN) por sus aportes, discusiones, interés y ayuda en mi trabajo. En especial, quiero agradecer a mis compañeros Camilo Cano, Cristian Triana y Nicolás Ospina, quienes apoyaron, asesoraron y colaboraron en el desarrollo de distintas actividades del proyecto.

A los laboratorios de Ensayos Hidráulicos e Ingeniería Química, por permitirme realizar las caracterizaciones de los sensores en sus instalaciones.

A La Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, mi alma mater que me ha formado integral y profesionalmente, a la cual tengo un profundo sentimiento de pertenencia, orgullo y agradecimiento.

A mi tío Alberto Sosa, mi tía Ester Mancipe, Camilo Sosa, Laura Rodríguez, Marcela Fernández, Nicolas Velázquez, Kmilo Rodríguez por su colaboración en distintas actividades de la instalación del prototipo y apoyo en la etapa de medición.

Al señor Pedro Álvarez, por permitir realizar la implementación del prototipo y toma de mediciones en sus predios en la vereda de Puente de Boyacá, departamento de Boyacá, Colombia.



## Resumen

En este trabajo final de maestría se presenta los sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg FBG (Fiber Bragg Gratings) como una posible solución para la medición de variaciones espacio - temporales de temperatura en aplicaciones hidrológicas. Puntualmente se presenta un prototipo de medición de variaciones de temperatura del agua debidas a la interacción entre la superficie y el subsuelo en un arroyo de montaña, basado en redes de difracción de Bragg.

En este trabajo, se realizó el diseño de cuatro arreglos de pares de sensores FBG, para los cuales se determinó la respuesta en temperatura obteniendo curvas de caracterización con coeficientes de determinación por encima de 0.9998 para cada uno de los sensores FBG. Adicionalmente, los sensores fueron sometidos a pruebas de cambio de nivel de la columna de agua hasta 55 cm. Las mediciones validaron que los sensores diseñados son insensibles a variaciones de presión debidas al nivel de agua hasta los límites evaluados en la prueba.

Finalmente, en un arroyo ubicado en las montañas de Puente de Boyacá, Boyacá, Colombia, se implementó el sistema prototipo de medición en 3 distintos puntos de interés y se realizaron mediciones simultáneas de temperatura por un periodo de 24 horas. Los resultados obtenidos, permitieron obtener gradientes de temperatura para cada zona de interés, y el gradiente espacio – temporal de temperatura del agua en su interacción entre superficie y subsuelo. Se obtuvo el mayor gradiente de temperatura entre el agua superficial y el agua subterránea para el arreglo de sensores ubicado en la primera posición, con un valor de 1.4°C. Por su parte, el máximo gradiente de temperatura para los arreglos de sensores ubicados en la segunda y tercera posición fue de 0.6°C y 0.45°C respectivamente.

***Palabras Clave: agua superficial, agua subterránea, redes de difracción de Bragg FBG, gradientes de temperatura, arroyo de montaña, zona hiporreica.***

## Abstract

This final master's project presents the optical sensors based on fiber Bragg gratings (FBG) as a possible solution for the measurement of spatiotemporal variations of temperature in hydrological applications. Specifically, it presents a prototype for measuring water temperature variations due to the interaction between the surface and the subsoil in a mountain stream using fiber Bragg gratings.

In this document, four arrays of FBG sensor pairs were designed. Their temperature responses were characterized obtaining curves with coefficients of determination above 0.9998 for each of the FBG sensors. Moreover, these FBG sensors were tested under a water column level up to 55 cm. Measurements validated that the designed sensors are insensitive to variations in the level of water up to the limits evaluated in the test.

Finally, the prototype measurement system was implemented at 3 different points of interest in a stream located in the mountains of Puente de Boyacá, Boyacá, Colombia. Simultaneous temperature measurements were made for a period of 24 hours. Temperature gradients for each area of interest were obtained as well as the spatiotemporal gradient of water temperature in its interaction between surface and subsoil. The highest gradient with a maximum temperature between surface water and groundwater of 1.4°C was obtained for the arrangement of sensors located in the first position. The maximum temperature gradient for sensor arrays located in the second and third positions was 0.6°C and 0.45°C respectively.

***Keywords: surface water, groundwater, fiber Bragg gratings (FBG), temperature gradients, mountain stream, hyporheic zone.***

# Contenido

Resumen .....	ix
Abstract.....	x
Contenido .....	xi
Lista de Ilustraciones .....	xiii
Lista de tablas.....	xvi
Introducción .....	1
Objetivos.....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos .....	4
Capítulo 1: Marco teórico.....	5
1.1 Interacción del agua entre la superficie y el subsuelo .....	5
1.1.1 Zona Hiporreica.....	5
1.2 Redes de difracción de Bragg.....	7
1.2.1 Tipos de redes de difracción de Bragg.....	10
1.2.2 Tipos de empaquetado para sensores FBG.....	13
1.2.3 Estado del arte de sensores FBG de temperatura .....	15
1.2.4 Sensores FBG de temperatura comerciales .....	18
Capítulo 2. Sistemas de interrogación .....	21
2.1 Interrogadores ópticos .....	21
2.2 Sistema Interrogador fibras sm125.....	26
Capítulo 3. Diseño del prototipo del sistema de medición.....	29
3.1 Determinación de las condiciones físicas del arroyo .....	29
3.2 Diseño del sensor multipunto.....	35
Capítulo 4. Resultados y Análisis.....	39
4.1 Caracterización de la red de sensores .....	39
4.2 Prueba del prototipo en el laboratorio de Ensayos Hidráulicos.....	44

4.3 Implementación del prototipo en un tramo de un arroyo de montaña: Resultados y análisis.....	48
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro .....	71
Referencias.....	74

## Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. La zona Hiporreica.....	6
Ilustración 2: Difracción de una onda de luz por una rejilla .....	8
Ilustración 3: Esquema de funcionamiento de un FBG. Adaptado de [24]. ....	9
Ilustración 4. Redes de difracción Uniforme. ....	11
Ilustración 5. Espectro de reflexión de una red apodizada y una red sin apodizar. ....	12
Ilustración 6. Patrón de una red de difracción inclinada.....	12
Ilustración 7. Patrón de una rejilla de Bragg con Chirp. ....	13
Ilustración 8. Estructura de empaquetado con PVC para una red de difracción de Bragg. Adaptado de [36]. ....	14
Ilustración 9. Diagramas esquemáticos para los encapsulados de los sensores FBG con láminas de polipropileno. Adaptado de [37]. ....	15
Ilustración 10. Encapsulado para sensor FBG usado en la medición de temperatura subterránea. Adaptado de [40]. ....	16
Ilustración 11. Esquema de Sensor tipo cadena implementado. Adaptado de [41]. ....	16
Ilustración 12. a) esquema de compensación de temperatura. b) Posicionamiento de los arreglos de los sensores FBG. Adaptado de [42]. ....	17
Ilustración 13. Sensor FBG en fibra desnuda. ....	18
Ilustración 14. Sensores FBG con encapsulado no metálico. Tomado de [44]. ....	19
Ilustración 15. sensor FBG con encapsulamiento metálico. ....	19
Ilustración 16. Arreglo de dos sensores de temperatura FBG. ....	20
Ilustración 17. Esquema básico de un sistema de interrogación óptico. ....	22
Ilustración 18. Diagrama de bloques para el sistema de interrogación por filtro de bordes. Adaptado de [48]. ....	23
Ilustración 19. Diagrama de bloques para el sistema de interrogación de doble FBG. Adaptado de [49]. ....	23
Ilustración 20. Diagrama esquemático del sistema de interrogación con una plataforma FPGA-ARM. adaptado de [50]. ....	24
Ilustración 21. Esquema de un sistema de interrogación basado en un policromador. Adaptado de [51]. ....	25
Ilustración 22. Esquema del sistema interrogador SM125. ....	27
Ilustración 23. Interfaz gráfica del software ENLIGHT. ....	27
Ilustración 24. Arroyos de interés. ....	30
Ilustración 25. Posibles puntos de interés en el arroyo seleccionado para las pruebas. ....	31

Ilustración 26. Ubicación del primer sensor FBG.....	32
Ilustración 27. Ubicación del segundo sensor FBG. ....	33
Ilustración 28. Ubicación del tercer sensor FBG. ....	33
Ilustración 29. Ladera del arroyo con riesgo de derrumbe.....	34
Ilustración 30. Ubicación satelital del lugar de la implementación. ....	35
Ilustración 31. Arreglos de sensores FBG diseñados. ....	38
Ilustración 32. Esquema para caracterizar la red de sensores FBG de temperatura.....	39
Ilustración 33. Ubicación del arreglo de sensores FBG dentro del horno. ....	40
Ilustración 34. Perfil de temperatura del horno usado en la caracterización de los sensores FBG. ....	41
Ilustración 35. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG11 y FBG12.....	41
Ilustración 36. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG21 y FBG22.....	42
Ilustración 37. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG31 y FBG32.....	42
Ilustración 38. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG41 y FBG42.....	42
Ilustración 39. Esquema de la prueba de cambio de nivel de agua para el prototipo de medición.....	44
Ilustración 40. Canal de agua con los sensores FBG. ....	44
Ilustración 41. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG11 y FBG12. ....	45
Ilustración 42. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG21 y FBG22. ....	46
Ilustración 43. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG31 y FBG32. ....	46
Ilustración 44. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG41 y FBG42. ....	46
Ilustración 45. Medición de temperatura en la prueba de nivel del prototipo.	47
Ilustración 46. ubicación de los sensores FBG en la primera implementación del prototipo. ....	50
Ilustración 47. Registro de temperatura del arreglo de sensores FBG4 en la posición A. ....	51
Ilustración 48. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG3 en la posición B. ....	52
Ilustración 49. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición A. ....	53
Ilustración 50. Gradiente temporal de temperatura en la posición A.....	53
Ilustración 51. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición B. ....	54
Ilustración 52. Gradiente temporal de temperatura en la posición B.....	55
Ilustración 53. Estructura diseñada para la instalación del arreglo de sensores FBG. ....	57

Ilustración 54. Esquema de conexión para el sistema de medición en campo.	57
Ilustración 55. Campamento de los equipos de medición.	58
Ilustración 56. Arreglo de sensores FBG4 instalado en la posición 1.	59
Ilustración 57. Arreglo de sensores FBG2 instalado en la posición 2.	59
Ilustración 58. Arreglo de sensores FBG3 instalado en la posición 3.	60
Ilustración 59. Medición de los sensores FBG en campo.	60
Ilustración 60. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG4 en la posición 1.	61
Ilustración 61. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 1.	62
Ilustración 62. Gradiente temporal de temperatura en la posición 1.	63
Ilustración 63. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG2 en la posición 2.	63
Ilustración 64. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 2.	64
Ilustración 65. Gradiente temporal de temperatura en la posición 2.	65
Ilustración 66. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG3 en la posición 3.	66
Ilustración 67. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 3.	67
Ilustración 68. Gradiente temporal de temperatura en la posición 3.	68
Ilustración 69. Gradiente espacio - temporal de temperatura entre el agua superficial y el agua subterránea del área de interés.	69

## Lista de tablas

Tabla 1. Desviación estándar de los datos obtenidos por cada sensor para la prueba de nivel. ....	47
---	----



## Introducción

Los cuerpos de agua dulce son muy importantes para la tierra debido a que cumplen un rol de integradores en varios procesos geológicos y ecológicos que se llevan a cabo es las cuencas hidrológicas. Entre estos cuerpos de agua, los ríos cumplen un enorme papel social como lo son ser fuentes de agua potable, productores de energía y proporcionar entornos para la vida silvestre.

Se tiene conocimiento que dentro de estas fuentes hídricas se llevan intercambios constantes con los sedimentos de los lechos de ríos y arroyos, las llanuras de inundación, las áreas circundantes a los mismos y también intercambios con las aguas subterráneas. Es importante comprender cómo es el comportamiento de los intercambios que se producen entre agua superficial y subterránea que repercuten en la calidad del agua [1].

Por tal razón se han realizado en diferentes partes del mundo estudios de la zona hiporreica donde se llevan a cabo los procesos de carga y recarga entre el agua superficial y el agua subterránea, y una de las formas de entender cómo se producen estos procesos es mediante la medición de las variaciones de temperatura que se producen a lo largo de la zona hiporreica con respecto al agua superficial [2].

En particular, Colombia se caracteriza por tener polos de desarrollo en las zonas altas de sus montañas y, en consecuencia, los ríos presentan características diferentes a aquellos ubicados en zonas planas (típicamente referenciados en la literatura especializada), por lo que realizar este tipo de estudios en corrientes de alta montaña es de suprema importancia para la caracterización de los recursos hídricos colombianos.

Frecuentemente el ambiente ecológico de la zona hiporreica es amenazado debido a la reducción de la conexión hidráulica, lo cual afecta los procesos de intercambio entre el agua superficial y subterránea. Además, aunque a nivel internacional la zona hiporreica se ha venido estudiando por medio de varias investigaciones [3], en Colombia se han llevado a cabo muy pocas investigaciones alrededor de esta temática. En este momento, son muy pocas las aproximaciones a este estudio en Colombia [3] [4]. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace importante estudiar la zona hiporreica en el país.

Una de las formas de poder entender estos procesos de intercambio en la interacción del agua en la superficie y el subsuelo es mediante mediciones de gradientes de temperatura entre el agua superficial y la zona hiporreica. Para ello se pueden utilizar diferentes tipos de sensores de temperatura con la característica de poder realizar mediciones fiables debajo del agua como por ejemplo arreglos de termopares para medición de temperatura multipunto [5]. Sin embargo, para poder llevar un registro de temperatura con estos sensores, primero se debe realizar la adquisición de la señal, y segundo debido a que utilizan para su conectividad tecnología de cobre, las pérdidas en largas distancias son grandes, por lo cual solo se pueden realizar mediciones a corta distancia.

Por otra parte, se encuentran los sensores de fibra óptica los cuales se pueden clasificar en distribuidos y cuasi-distribuidos. Se ha usado la fibra óptica como sensor distribuido, con las ventajas inherentes a la fibra óptica como su aplicación en largas distancias, bajo costo de la fibra óptica, son livianos y bajos niveles de atenuación [6]. Sin embargo, si bien es cierto que la fibra óptica tiene un bajo costo, un problema de los sistemas distribuidos son los equipos requeridos para realizar la adquisición e interpretación de las mediciones debido a que son relativamente costosos, lo cual representa una desventaja [7].

Por esta razón, se han buscado otro tipo de sistemas de medición de temperatura que, no tenga los problemas de los sensores tradicionales como los termopares, pero a su vez que no sean tan costosos como los sistemas de medición de temperatura por fibra óptica distribuida, y es ahí donde se encuentra los sensores FBG (por sus siglas en inglés: Fiber Bragg grating), o mejor conocidos en español como redes de difracción de Bragg. Las redes de difracción de Bragg son sensores realizados en fibra óptica al modificar el índice de refracción de manera periódica en una determinada zona de la fibra óptica [8]. Estos sensores se pueden encontrar o mandar fabricar en el mercado con un costo en el orden de los cientos de dólares.

Además, las redes de difracción se han planteado para diferentes tipos de aplicaciones como en obras civiles, aeronáutica, telecomunicaciones y la industria petroquímica debido a que para este tipo de aplicaciones presentan grandes ventajas como lo son la aplicación en larga distancias, uso en ambientes hostiles, son químicamente inertes, son inmunes a interferencia EMI, aplicación en medición distribuida, entre otros [9] [10].

De esta manera este trabajo plantea un diseño de un sistema de medición de temperatura espacio - temporal a través de la zona hiporreica mediante el uso de redes de difracción Bragg y la implementación de un prototipo en un arroyo de montaña colombiano.

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera. Primero, se presenta una sección con los objetivos del trabajo seguido de 5 capítulos descritos a continuación:

El capítulo 1, hace referencia al marco teórico del trabajo, donde se muestran los conceptos básicos aplicado, como lo son la zona hiporreica y su importancia. El énfasis de este capítulo está en la sección de las redes de difracción de Bragg, donde se muestra brevemente su teoría, tipos de redes de difracción, empaquetados reportados en el estado del arte, estado del arte, y sensores comerciales.

El capítulo 2, hace referencia a los sistemas de interrogación óptica para la configuración de las redes de difracción utilizadas, para lo cual se hace una revisión del estado del arte y se determina el sistema de interrogación. En esta parte se hará un énfasis técnico con el fin de determinar características importantes en la etapa de diseño.

El capítulo 3, presenta la etapa de diseño, donde en primera instancia se muestran las características del lugar donde se implementó el sistema. En general se buscan condiciones que favorezcan la zona hiporreica, la accesibilidad a la ubicación, la seguridad del sitio, y la viabilidad de la instalación. En la segunda parte de este capítulo, se presenta el diseño de la red de difracción, en el cual se presentan las características físicas y técnicas que son requeridas en las redes de difracción de Bragg para poderlas fabricar.

El capítulo 4, muestra los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, en este capítulo se presentan todas las caracterizaciones y pruebas realizadas a las redes de difracción de Bragg, así como su implementación en un arroyo de montaña. Al finalizar este capítulo se presenta el análisis de los datos obtenidos en la implementación.

El capítulo 5, presenta las conclusiones obtenidas en el presente trabajo, seguido de las referencias utilizadas en el desarrollo del mismo.

# Objetivos

## Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de un sistema para medir variaciones espacio-temporales de la temperatura en la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea en un tramo de un arroyo de montaña colombiano utilizando redes de difracción de Bragg.

## Objetivos Específicos

- I. Determinar las condiciones físicas del tramo del arroyo de montaña donde se implementará el sistema y determinar la ubicación de las redes de difracción del sensor.
- II. Diseñar un sensor multipunto usando redes de difracción para la medición de temperatura.
- III. Caracterizar el sensor multipunto diseñado.
- IV. Determinar cuáles tipos de sistemas de interrogación son adecuados para este tipo de sensor.
- V. Validar el prototipo del sistema de medición de temperatura diseñado en laboratorio y en un tramo de arroyo de montaña.

# Capítulo 1: Marco teórico

En este capítulo se presenta una introducción a los conceptos principales, bases técnicas y estado del arte necesarios para la realización de este proyecto. El capítulo está dividido en dos secciones. La sección 1.1 describe el concepto y la importancia de la zona hiporreica. La sección 1.2 hace referencia a los fundamentos de las redes de difracción de Bragg, sus métodos de fabricación, tipos y empaquetados. Para finalizar el capítulo se presentan algunos sensores comerciales.

## 1.1 Interacción del agua entre la superficie y el subsuelo

La importancia de los cuerpos de agua radica en que tienen el papel de ser integradores en diferentes procesos ecológicos y geológicos, los cuales se llevan a cabo en las cuencas hidrológicas. Desde hace un tiempo se sabe que dentro de los cuerpos de agua existe una interacción del agua entre la superficie y el subsuelo, que se lleva a cabo continuamente en los sedimentos principalmente en los ríos y arroyos [1]. Según lo reportado en la literatura, se han identificado procesos denominados de carga y descarga entre el agua superficial y subterránea, dichos procesos se llevan a cabo en la zona hiporreica [2]. Por tal motivo, a continuación, se presenta el concepto, importancia y un breve estado del arte de la zona hiporreica.

### 1.1.1 Zona Hiporreica

La zona hiporreica se puede describir como un compartimiento sedimentado ubicado entre el agua superficial (Entiéndase por agua superficial a toda el agua sobre la superficie de la tierra, que forma ríos, lagos, arroyos, etc) y el agua subterránea (Entiéndase por el agua subterránea a toda agua que se encuentre en el subsuelo, en la zona de saturación y la que esté en contacto directo con el suelo o subsuelo [11]) donde estos dos tipos de aguas se mezclan y hay un flujo de agua constante [12].

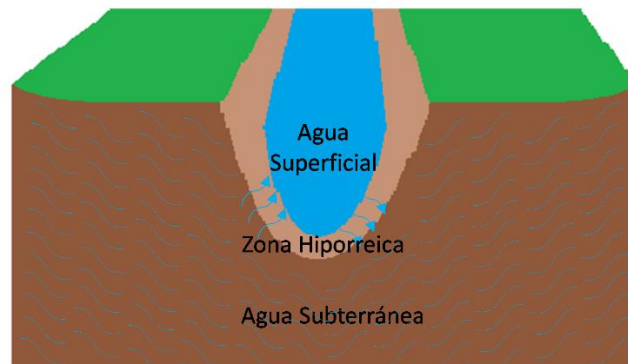


Ilustración 1. La zona Hiporreica.

La zona hiporreica se caracteriza por ser dinámica, en ella ocurren procesos de intercambio de agua y materiales (tales como nutrientes) entre el agua superficial y el agua subterránea conocidos como procesos de carga y descarga. En la Ilustración 1 se presentan la zona hiporreica y los procesos de carga y descarga. Esta zona se puede ubicar en lagos, ríos, humedales y arroyos [13] [14]. Especialmente, esta zona se puede encontrar en dunas, escalones y rápidos debido a que estos escenarios son propicios para los procesos de infiltración, los cuales son fundamentales en estas áreas [3].

La zona hiporreica ha sido estudiada a nivel internacional en distintos tipos de ríos, para lo cual han medido una serie de variables, entre ellas la temperatura. Esto debido a que el agua superficial es más susceptible de cambiar su temperatura cuando varía la temperatura del ambiente, mientras que en la zona hiporreica y en el agua subterránea estos cambios se producen más lentamente. Con base en lo anterior, debido a los procesos de carga y descarga que se producen en la zona hiporreica, se inducen variaciones de temperatura cuando se realizan los intercambios de agua, lo cual va a repercutir en implicaciones bioquímicas. Junto a la temperatura también hay otros factores como el cambio del pH y diferencias en la composición química (agentes oxidantes y reductores) que repercuten en la calidad del agua [3].

Al hacer una revisión del estado del arte, se han realizado mediciones de temperatura con diferentes sistemas. En el año 2015, en USA cuantificaron varias variables en un río de Pensilvania (EEUU), usando diferentes técnicas, entre ellas sensores piezoeléctricos para medir temperatura. En este experimento, ubicaron 2 sensores en 2 zonas hiporreicas distintas de un mismo río, y los colocaron a diferentes profundidades, de la zona hiporreica. De esta forma obtuvieron diferentes temperaturas en zonas profundas y zonas superficiales, y estimaron tasas de filtración vertical para estas zonas [15].

También en 2015, se realizó la medición de variaciones espacio-temporales de temperatura en una cuenca árida en China, para lo cual usaron sensores de temperatura distribuidos de fibra óptica FO-DTS (por sus siglas Fibre-optic

Distributed Temperature Sensing) es decir, toda la fibra óptica se comporta como un sensor distribuido. En este artículo, mencionan que hicieron estas mediciones a lo largo de 2 kilómetros por cerca de un día, así pudieron recolectar suficientes datos para observar cómo eran las variaciones de temperatura en esta cuenca [2].

Otro estudio presentado en 2018, el cual fue llevado a cabo en el río Sangamon de Illinois Estados Unidos, incorporó un sistema de medición de temperatura mediante sensores de fibra óptica distribuidos FO-DTS para monitorear las variaciones de temperatura del lecho de un arroyo en un tramo de 1 km para identificar zonas donde haya descarga de agua subterránea. Realizaron una prueba por 14 días en el verano de 2017 donde en general se observó que la temperatura varió de manera uniforme, explicándose por las dinámicas diurnas atmosféricas. En un área ubicada a 25 metros del inicio de la medición, se encontraron variaciones anormales de doble retardo durante la prueba, a lo cual se le asoció el posible proceso de descarga de aguas subterráneas [16].

Por último, se presenta un estudio en Holanda en 2019, donde se realizaron mediciones de temperatura en dos corrientes en tierras bajas usando fibra óptica distribuida FO-DTS con el objetivo de determinar el efecto del agua subterránea y el posible rol de esta en la mitigación de los efectos debidos al cambio climático. El estudio identificó tanto puntos calientes como manantiales de infiltración que cumplen el papel de amortiguar la temperatura tanto en las temporadas de invierno y verano [17]. Aunque los sistemas de medición FO-DTS han demostrado importantes resultados para este tipo de aplicaciones, tienen la desventaja de que el sistema de detección e interpretación de datos es muy costoso.

## **1.2 Redes de difracción de Bragg**

Las redes de difracción de Bragg o FBG (por sus siglas en inglés Fiber Bragg Grating) se han estudiado a profundidad y se han utilizado como sensores ópticos para la medición de distintas variables, tales como temperatura, deformación y presión, entre otras [18] [19]. La gran acogida que han tenido los sensores ópticos se debe a una serie de características, entre las que se pueden destacar que son dispositivos compactos, tienen bajas pérdidas de potencia por inserción, bajo costo, inmunidad a interferencia electromagnética, son químicamente inertes, son de fácil integración en los sistemas de fibra óptica, poseen bajo peso, alta durabilidad y flexibilidad, se pueden integrar a lo largo de grandes distancias y pueden ser usados de manera distribuida [20].

La aplicación de los sistemas de medición mediante sensores FBG ha tenido una gran acogida en varios escenarios, en especial en el campo de la ingeniería civil debido a la necesidad de monitorear gran cantidad de variables en distintos tipos de estructuras [21].

Las redes de difracción de Bragg son elementos que tienen funciones de filtrado y reflexión eficientes. Estas características hacen que las redes de difracción de Bragg puedan ser utilizadas en comunicaciones o como sensores ópticos [22].

Las redes de difracción de Bragg son una perturbación que se induce en el núcleo de una fibra monomodo, el cual afecta el índice de refracción de la fibra con un periodo determinado [22].

Cuando se analiza una simple red de difracción ideal, teniendo como condición que solo va a presentar un modo propagante y un modo contrapropagante en una longitud de onda, se produce un efecto en la onda incidente ocasionado por la condición de Bragg [23], el cual se describe en la siguiente ecuación:

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.2.1)$$

Donde  $\beta_1$  es el modo propagante,  $\beta_2$  es el modo contrapropagante y  $\Lambda$  es la separación periódica entre los planos de la rejilla y  $m$  determina el orden de difracción (ver Ilustración 2) [23].

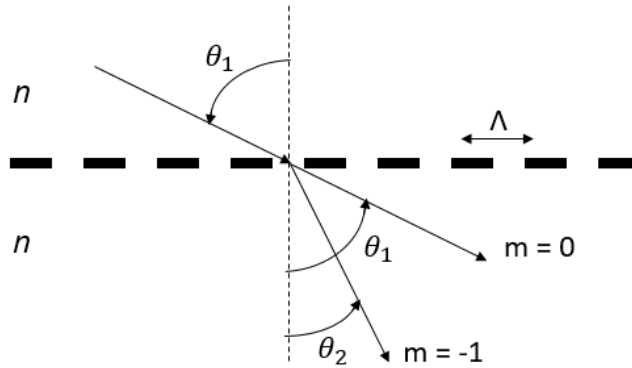


Ilustración 2: Difracción de una onda de luz por una rejilla

A su vez, se define la constante de propagación como:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \quad (1.2.2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda incidente,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo. Ahora, reemplazando la ecuación 1.2.2 en la ecuación 1.2.1, además, teniendo en cuenta que para una red de difracción uniforme solo se considera el primer modo de propagación,  $m= -1$  y se asume que la constante de la onda contrapropagante es negativa debido a que su sentido es opuesto al sentido de la onda incidente [23]. Se obtiene:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\eta_{eff,1} + \eta_{eff,2}} \quad (1.2.3)$$



De la anterior ecuación, se determina para el caso de una red de difracción uniforme con una onda incidente e índice de refracción  $n_{eff}$ , la longitud de onda de Bragg [23], la cual es:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.2.4)$$

Donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg. Entonces, el principio de detección utilizado en un sensor FBG es que tanto el índice de refracción efectivo ( $n_{eff}$ ) como la separación periódica entre los planos de rejilla ( $\Lambda$ ) son afectados por perturbaciones externas tales como la temperatura y deformación, induciendo así un cambio en la Longitud de onda reflejada [24]. Las perturbaciones ocasionadas en la fibra forman un filtro para longitudes de onda determinadas por la longitud de onda de Bragg, que satisface la condición de Bragg [22].

La Ilustración 3 muestra el funcionamiento básico de una red de difracción de Bragg inscrita en el núcleo de una fibra monomodo. La red de difracción de Bragg tiene asociada una longitud de onda particular que cumple la condición de Bragg. Si se hace incidir una señal de ancho espectro por la fibra óptica, se observará que se producen dos señales: una parte de la señal será transmitida y otra parte de la señal será reflejada.

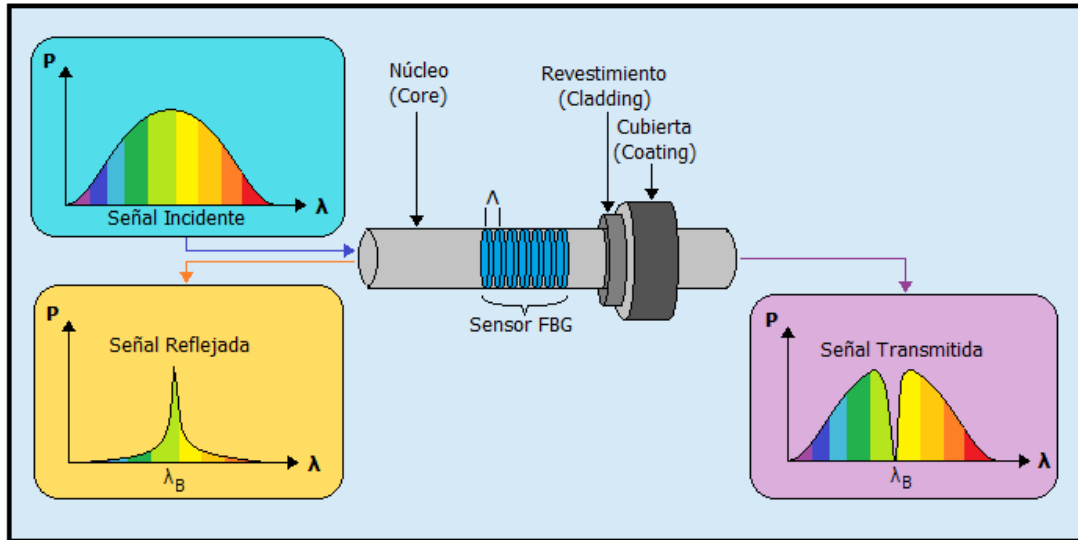


Ilustración 3: Esquema de funcionamiento de un FBG. Adaptado de [24].

Utilizando la información de la señal reflejada se puede conocer la longitud de onda de Bragg inscrita o el cambio de esta longitud de onda el cual será proporcional a la variable que lo ocasionó (temperatura o deformación mecánica). Entonces, cuando la fibra con el sensor FBG se expone a un cambio de temperatura  $\Delta T$ , o un estiramiento o una compresión  $\Delta l$ ,  $\Delta \lambda_B$  cambiará espectralmente proporcionalmente a la acción externa [24]. En este caso, la longitud de onda de Bragg tiene una dependencia con la temperatura y la deformación, la cual puede ser descrita por:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \eta_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} + \Lambda \frac{d\eta_{eff}}{dT} \right) \Delta T + 2 \left( \eta_{eff} \frac{d\Lambda}{dl} + \Lambda \frac{d\eta_{eff}}{dl} \right) \Delta l \quad (1.2.5)$$

En donde el primer término representa el efecto de la temperatura, y el segundo término representa el efecto de deformación sobre el sensor FBG. Típicamente, para la temperatura el cambio de longitud de onda fraccional en  $\lambda_B$  es del orden de 10 pm/°C. Dependiendo de cuál sea la instrumentación del sistema utilizada para demodular el desplazamiento de longitud de onda, el sensor puede ser utilizado para detectar cambios estáticos y dinámicos [24].

Las redes de difracción de Bragg pueden ser inscritas por dos métodos: inscripción interna (solo se puede inscribir una rejilla de Bragg) e inscripción externa. Las técnicas de fabricación más comunes para la inscripción externa son: Técnica de Fabricación Interferométrica, Técnica de Fabricación Punto a Punto, y Técnica de Fabricación por Máscara de Fase, siendo la última la más utilizada debido a su alta eficiencia, versatilidad y su fácil implementación [22] [25].

La técnica de fabricación interferométrica se basa en hacer incidir un haz proveniente de un láser ultravioleta, el cual es dividido en dos haces coherentes, y luego estos dos haces son recombinados en un ángulo  $\theta$  usando dos espejos ultravioletas, los cuales controlan cómo se va a formar el patrón de radiación independiente de la longitud de onda del láser ultravioleta [26].

La técnica de fabricación Punto a Punto es una técnica basada en la exploración no holográfica. Esta técnica realiza la inscripción de la rejilla periodo por periodo directamente sobre la fibra óptica, mediante la exposición de pequeñas secciones de cierto ancho a un único pulso de energía concentrada, y de ahí se deriva el nombre de esta técnica [27]. Su principal ventaja es que al realizar la inscripción punto a punto permite realizar patrones de diferentes tipos de redes de difracción de Bragg [28].

La técnica de inscripción por máscara de fase ha sido ampliamente reportada por la literatura como un método mejorado para la inscripción de la rejilla de Bragg [29]. La máscara de fase puede describirse como un elemento óptico difractivo el cual es capaz de modular espacialmente un haz de luz láser UV. La máscara de fase puede ser producida mediante procesos holográficos o litográficos, como un patrón periódico de superficie [30]. Con este método se pueden realizar patrones complejos de rejillas de Bragg, el proceso se utiliza para la producción de casi un 100% de inscripción de rejillas refractantes [31].

### 1.2.1 Tipos de redes de difracción de Bragg

Las redes de difracción de Bragg poseen características que dependen de distintos factores; uno de ellos es la modulación del índice de refracción que inscribe el patrón en el núcleo de la fibra óptica. Estas variaciones en el índice

de refracción dan lugar a la clasificación de las redes de difracción en tipos de redes. A continuación, se presentan los 4 tipos de patrones de difracción que pueden ser inscritos, estos son: redes de difracción uniformes, redes de difracción apodizadas, redes de difracción inclinadas y redes de difracción con chirp.

### Redes de difracción uniformes

Las redes de difracción uniformes presentan tanto el mismo periodo de perturbación inscrito en la fibra óptica como la misma modulación del índice de fase y, la perpendicularidad de las rejillas con respecto a los frentes de fase. Cuando un haz de luz que se propaga a lo largo de la fibra se encuentra con la rejilla, las longitudes de onda que no cumplen con la condición de Bragg lograrán atravesar la rejilla experimentando una muy pequeña reflexión de vuelta, mientras que la longitud de onda que cumple con la condición de resonancia será reflejada con una porción mayoritaria de su componente inicial [22] [32].

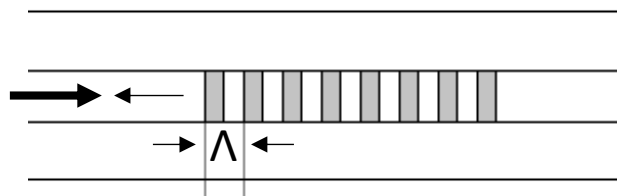


Ilustración 4. Redes de difracción Uniforme.

En la Ilustración 4 se muestra el patrón la rejilla de la red de difracción. Este tipo de red de difracción presenta lóbulos laterales considerables, que, aunque se distinguen claramente de la longitud de onda de Bragg, hacen que no sea un filtro muy estrecho, lo cual puede ser indeseable si se necesita una frecuencia o longitud de onda muy específica.

### Redes de difracción apodizadas

Como se mencionó anteriormente, en las redes de difracción uniformes, la amplitud de los lóbulos laterales puede ser considerable comparada con la longitud central. Para aquellas aplicaciones en donde se necesita una longitud de onda o frecuencia específica, es necesario el uso de otro tipo de redes de difracción conocidas como las redes de difracción apodizadas. Este tipo de redes se caracterizan por suprimir estos lóbulos o al menos mitigar los lóbulos cercanos a la longitud de onda de Bragg. Esto se logra mediante la variación gradual del coeficiente de acoplamiento tanto para el haz de luz incidente como para el haz de luz que sale, y a esta variación gradual se le conoce como apodización [26]. En la Ilustración 5 se observa el espectro de reflexión para una red de difracción apodizada y una red de difracción sin apodizar.

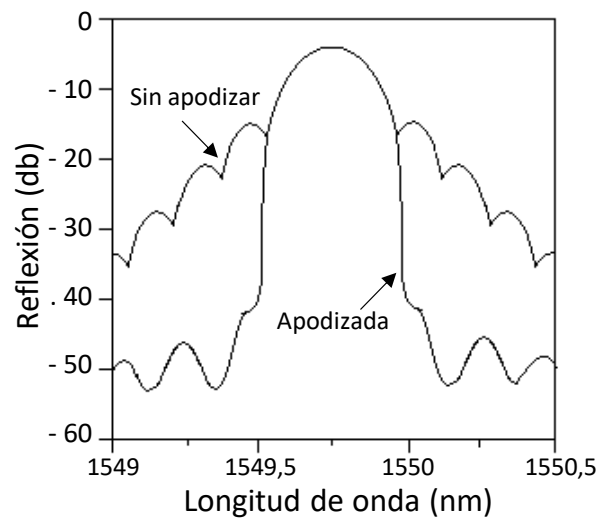


Ilustración 5. Espectro de reflexión de una red apodizada y una red sin apodizar.

Según lo reportado en el estado del arte, para la fabricación de redes de difracción apodizadas gaussianas, se puede utilizar el método de máscara de fase uniforme expuesta a 2 pulsos láser UV con retardo de tiempo variable para lograr la supresión de la reflectividad de los lóbulos laterales [33]. Una de las aplicaciones para este tipo de redes son los demultiplexores y multiplexores por división de longitud de onda (WDM), debido a que la separación de canales suele ser corta, y el ancho de línea de la red es vital para que el canal filtrado pueda tener lóbulos laterales suprimidos y cumpla con los estándares de la unión internacional de telecomunicaciones (ITU) para estas aplicaciones [34].

### Redes de difracción inclinadas

Las redes de difracción inclinadas (TFBG) son un tipo especial de variación de las redes de difracción uniformes. La diferencia en estas redes radica en que las rejillas van a ser inscritas con un cierto ángulo entre el plano transversal de la fibra y la rejilla [35]. Dicho ángulo en la inscripción de las rejillas añade un factor más a considerar en el cálculo de la longitud de onda de Bragg debido a que la inclinación de las rejillas determinará la eficacia de acoplamiento y por ende la luz que se extrae de la fibra [31]. La Ilustración 6 muestra el patrón de inscripción de una red de difracción inclinada.

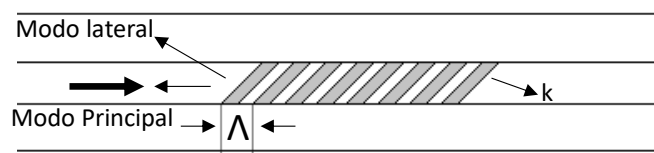


Ilustración 6. Patrón de una red de difracción inclinada.

Este tipo de redes de difracción encuentran aplicaciones para la medición de variables tales como deformación, temperatura, vibración; así como también pueden ser usados en aplicaciones en telecomunicaciones como elemento polarizador de fibra óptica, multiplexores de adición y caída, o inclusive como componente para amplificadores ópticos con fibra dopada de erbio (EDFA) [35].

### Redes de difracción con Chirp

Las redes de difracción con Chirp se caracterizan porque no poseen un periodo uniforme en las rejillas de Bragg a lo largo de la fibra óptica. Para este tipo de rejilla, las secciones que la conforman tienen diferente reflectancia a longitudes de onda por lo cual se obtiene un ancho de línea más ancho [34].

Estas redes pueden diseñarse de diferentes formas, siendo la más sencilla la mostrada en la Ilustración 7. Para entender de manera más intuitiva estas redes, se puede analizar como un conjunto de rejillas inscritas en una misma fibra óptica, por lo cual, las longitudes de onda que son reflejadas son la agrupación de los componentes espectrales reflejados por cada rejilla [22].

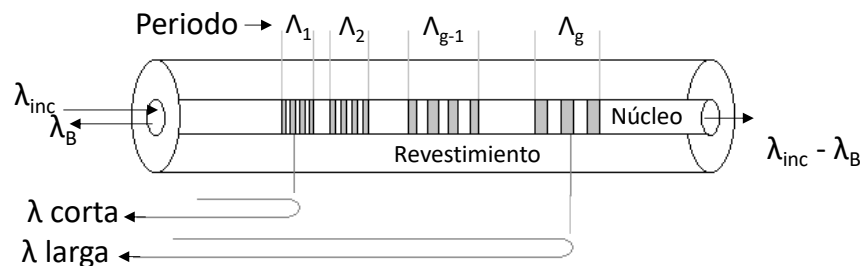


Ilustración 7. Patrón de una rejilla de Bragg con Chirp.

Las redes de difracción con Chirp tienen aplicaciones en donde haya requerimientos de un filtro de ancho de banda, especialmente tiene aplicaciones en telecomunicaciones donde se requieren filtros para eliminar determinados componentes, también se utiliza como compensador de dispersión, entre otras aplicaciones en tecnología de sensores [31].

### **1.2.2 Tipos de empaquetado para sensores FBG**

Las redes de difracción de Bragg han tenido gran acogida en las aplicaciones de monitoreo, en ambientes hostiles como estructuras civiles, industria petroquímica y como en el caso del presente trabajo, en hidrología. Sin embargo, exponer las redes de difracción en fibra desnuda o solo con recubrimientos de poliamida en este tipo de ambientes representa un riesgo inminente a la integridad del sensor, por lo cual tanto en la industria como en la investigación se han venido desarrollando empaquetados para ofrecer al sensor una protección al aplicarse en estos ambientes. A continuación, se

presentan algunos tipos de empaquetados en diferentes materiales reportados en las bases de datos.

El primer tipo de empaquetado es la integración de un sensor FBG en una lámina de Policloruro de Vinilo (PVC). Mediante esta técnica se garantiza la alta durabilidad y resistencia para usos en ambientes hostiles y permite a los sensores medir tanto deformación como temperatura. Esta estructura tiene una estabilidad dimensional superior al 99% [36]. La fabricación de este empaque se divide en 3 pasos: el primero es realizar una capa de PVC de 200  $\mu\text{m}$  de espesor, y calentar por 1 hora a 200  $^{\circ}\text{C}$ , luego, aplicar una segunda capa de PVC, esta vez el espesor es de 300  $\mu\text{m}$ , en esta capa se realiza el posicionamiento de la fibra en la sección donde se encuentra el sensor FBG, después de posicionada se repite el proceso de calentamiento para el curado del PVC por el mismo periodo de tiempo y temperatura. Para finalizar se deposita una tercera capa de PVC esta vez con un espesor de 400  $\mu\text{m}$ , y se realiza el proceso de curado térmico al igual que los 2 anteriores pasos [36]. La Ilustración 8 permite observar la estructura del sensor empaquetado por esta técnica.

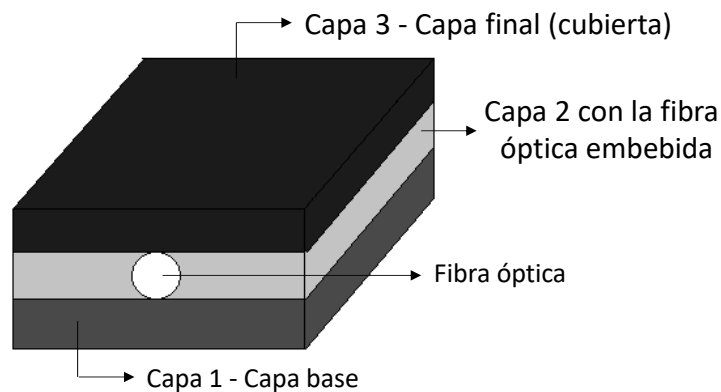


Ilustración 8. Estructura de empaquetado con PVC para una red de difracción de Bragg. Adaptado de [36].

El siguiente empaquetado que se presenta en esta sección, es realizado por placas de polipropileno. En [37] se diseñó y realizó la inscripción de unos sensores FBG para la medición simultanea de temperatura y deformación mediante el método de fabricación de máscara de fase. Los 2 sensores que se crearon en una misma fibra se empaquetaron mediante estructuras no uniformes que tenían como factor común una longitud de 80 mm a lo largo de la fibra. Se realizaron 3 modelos, con diferentes grosores y formas los cuales varían los coeficientes de deformación y temperatura para cada estructura, lo que permite tener un mayor control y maximizar la sensibilidad al realizar la medición de las variables [37]. En la Ilustración 9 se muestran las 3 formas en que se realizaron los empaquetados de los sensores FBG con láminas de polipropileno.

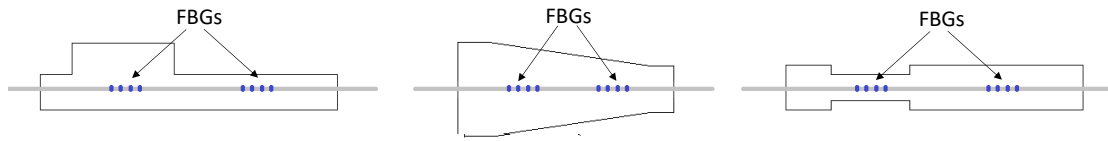


Ilustración 9. Diagramas esquemáticos para los encapsulados de los sensores FBG con láminas de polipropileno. Adaptado de [37].

El tercer empaquetado estudiado fue desarrollado para la medición de temperatura. El sensor solo tiene un conector por un extremo, mientras que por el otro está libre para hacer un sensor tipo sonda de prueba [38]. Para ello, los autores realizaron un recubrimiento al sensor en poliamida, para después embeberlo en un capilar de nitrato de aluminio cerámico. Sin embargo, debido a que el material del capilar es tan frágil, es necesario insertarlo en un tubo de acero inoxidable como medio de protección, el cual tiene un diámetro de 3.5mm. Este tubo tiene orificios a lo largo de él para evitar que afecte la medición. Por último, para garantizar que el sensor solo mida temperatura y no deformación, el sensor es fijado dentro de la sonda en un extremo y en el otro es dejado libre, así no se ve influenciado por la deformación ni del capilar, ni del tubo de acero [38].

Por último, para evitar la formación de microgrietas y desvitrificación, se presentan encapsulados tipo sonda con 5 materiales diferentes, los cuales son: Carburo de silicio, vidrio de borosilicato, acero inoxidable, cobre, nitrato de aluminio [39]. Similar a la sonda expuesta anteriormente, un sensor FBG con recubrimiento de poliamida es insertado en 5 capilares de los materiales antes mencionados. Las sondas tienen buena repetibilidad y sensibilidad. Las variaciones entre los materiales se observan en la linealidad, donde los recubrimientos en nitrato de aluminio, vidrio de borosilicato y acero inoxidable presentan índices de linealidad iguales o superiores a 99.9%, siendo el más lineal la sonda con encapsulado de nitrato de aluminio. Con los resultados obtenidos, los autores aprueban el uso práctico de estos encapsulados en ambientes hostiles [39].

### 1.2.3 Estado del arte de sensores FBG de temperatura

Actualmente, aunque los sensores FBG se han logrado establecer en los sistemas optoelectrónicos y metrológicos tanto en investigación como comercialmente, todavía se reportan novedades para mejorar diferentes características o nuevas aplicaciones. Para los sensores FBG de temperatura se reportan artículos donde se logran obtener mejores resoluciones de medida y diferentes tipos de encapsulados para aplicaciones específicas. En esta sección, se muestran algunos de los avances reportados en los últimos años.

En aplicaciones donde se posicionan sensores enterrados para la medición de temperatura, se presenta el problema que los cables enterrados en el suelo con el paso del tiempo se ven afectados por el asentamiento y la corrosión del suelo. A su vez, la sensibilidad cruzada del FBG de una fibra desnuda puede verse afectada por estos factores externos ya que pueden imprimir una deformación, y por ende una variación en longitud de onda no debida a la temperatura. En 2017, se diseñó un nuevo encapsulado para el monitoreo de temperatura de cable subterráneo mediante sensores FBG [40].

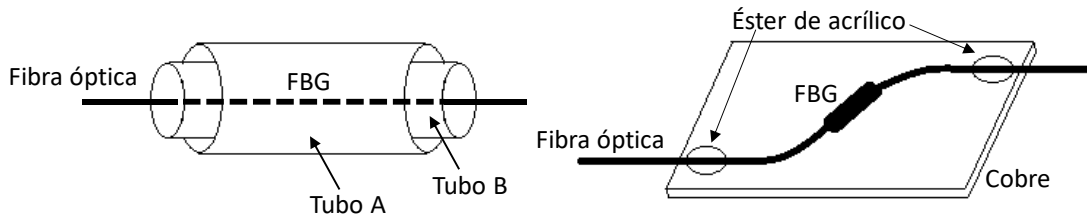


Ilustración 10. Encapsulado para sensor FBG usado en la medición de temperatura subterránea. Adaptado de [40].

La Ilustración 10 muestra el esquema de encapsulamiento y la estructura usada para posicionar el sensor FBG. El sensor fue recubierto por 2 tubos hechos de materiales poliméricos así: el primer tubo que se posiciona en el sensor es de cloruro de polivinilo, y el segundo tubo que se posiciona es de poliolefina. Posteriormente, se calienta por un periodo de 10 minutos a 100 °C y se deja enfriar a temperatura ambiente para garantizar una contracción constante. Adicionalmente, se diseña especialmente una estructura en cobre con una ranura para posicionar el sensor para mitigar el efecto de la deformación, para fijar la fibra se utilizó éster de acrílico para evitar los efectos debidos a la tensión. Los resultados reportados evidencian una gran reducción en la sensibilidad debida a la deformación, por el contrario, para la temperatura la sensibilidad se ve mejorada [40].

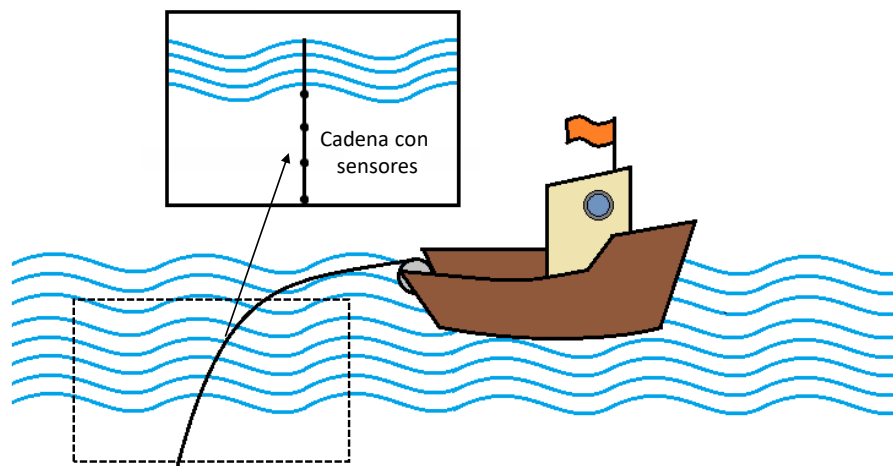


Ilustración 11. Esquema de Sensor tipo cadena implementado. Adaptado de [41].



En 2018, se reportó una aplicación de un sistema de medición de temperatura y profundidad mediante el uso de sensores FBG's en una fibra en el mar Amarillo. Para esta aplicación de validación se ensambló un sistema mejorado para la medición de temperatura y profundidad de fibra (o FTDMS por sus siglas en ingles). En el cual, en una misma cadena de 150 m se ensamblaron varios sensores FBG de temperatura, un sensor SBE56 y un sensor ALEC. Específicamente, este sistema puede dividirse en 2 partes: la primera contiene 10 sensores de temperatura, un sensor de presión y un sensor de temperatura compensada; la segunda parte está compuesta de una fuente láser, un interruptor de luz, un detector, un controlador y un circuito de control. Como resultado, se obtuvo un perfil de temperatura de alta resolución. La medición fue realizada en tiempo real tomando mediciones cada segundo, e independientemente de la medición manual para la adquisición de los datos [41]. La Ilustración 11 presenta el diagrama del sensor tipo cadena implementado en el mar amarillo del norte.

En 2019, Se reportó una aplicación para el monitoreo en línea en aisladores compuestos debido a que los aisladores sufren por la formación de hielo. Primero realizaron un diseño para detectar la carga de glaseado mediante el uso de 3 arreglos de sensores FBG dentro de un aislador compuesto para 10 kV (ver Ilustración 12 b)). Cada arreglo contenía 4 sensores, para medir deformación y temperatura, para ello, los sensores para medir temperatura fueron compensados mediante el encapsulado de tubos de cerámica y así eliminar el efecto de la tensión, es decir eliminar la sensibilidad cruzada (ver Ilustración 12 a)). Se realizaron experimentos de temperatura y de carga simulada con el fin de determinar la viabilidad del método. En temperatura las sensibilidades para todos los sensores FBG's fueron idénticas, de 10.68 pm/°C. para las pruebas con carga se encontró que el método es capaz de detectar cargas después de 0.5N [42].

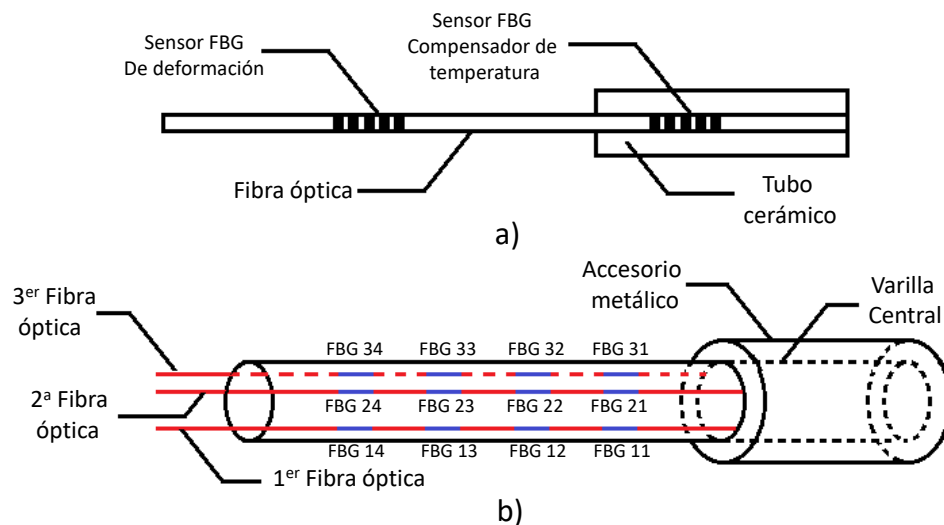


Ilustración 12. a) esquema de compensación de temperatura. b) Posicionamiento de los arreglos de los sensores FBG. Adaptado de [42].

#### 1.2.4 Sensores FBG de temperatura comerciales

Los sensores FBG se pueden encontrar de varios tipos en el mercado. Específicamente, para los sensores FBG de temperatura se presentan diferentes referencias las cuales son apropiadas dependiendo la aplicación. A continuación, se presentan algunos sensores FBG comerciales de temperatura.

##### Sensores FBG de temperatura en fibra desnuda o con recubrimiento de poliamida

Estos sensores son rejillas de Bragg, inscritas en la fibra en una alta gama de especificaciones ópticas, y se pueden utilizar tal y como se encuentran o se pueden encapsular en una gran cantidad de sensores para la detección óptica. Este tipo de sensor mide simultáneamente tensión y temperatura, por lo cual es importante para las aplicaciones de temperatura solo fijar un extremo del sensor, para que no se vea afectado por el ambiente que lo rodea. Son de fácil instalación y permiten la instalación en áreas pequeñas de difícil acceso. Si estos sensores tienen recubrimiento de poliamida, se pueden utilizar en la medición de la variable humedad [43]. En la Ilustración 13 se muestra un sensor FBG en fibra desnuda.

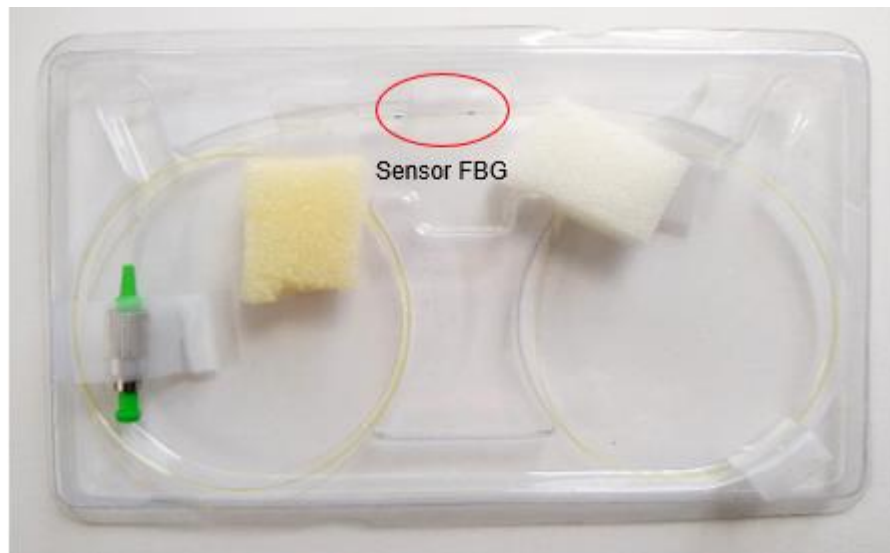


Ilustración 13. Sensor FBG en fibra desnuda.

##### Sensores de temperatura FBG con encapsulado no metálicos

Debido a que muchas de las aplicaciones necesitan utilizar un sensor encapsulado para protegerlo de ambientes hostiles, los sensores FBG con encapsulado no metálico han sido presentados como una solución para este tipo de aplicaciones. Con la principal ventaja que al no ser metálico continúa siendo inmune a la radiación electromagnética y además se puede utilizar en

zonas donde no es permitido el uso de sensores con componentes metálicos. Por lo general, estos sensores son insertados en un tubo capilar de cerámica de alúmina y son fijados en sus extremos [44]. La Ilustración 14 muestra unos sensores FBG con encapsulamiento no metálico del fabricante MICRON OPTICS.

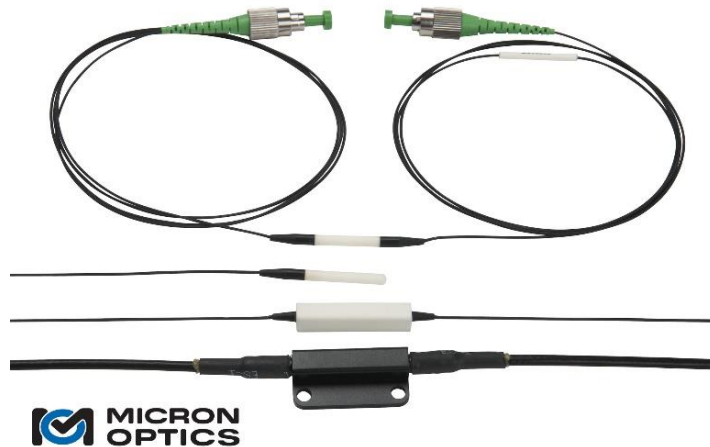


Ilustración 14. Sensores FBG con encapsulado no metálico. Tomado de [44].

#### Sensores de temperatura FBG con encapsulado metálico



Ilustración 15. sensor FBG con encapsulamiento metálico.

Otro tipo de sensores con encapsulamiento son los sensores de temperatura FBG con encapsulado metálico. Su uso es frecuente en ambiente hostiles, y su empaquetado les permite ser más resistentes que aquellos que tienen protecciones realizadas con materiales cerámicos. Se pueden empotrar en cemento, u otras estructuras y miden temperatura absoluta. Su mayor desventaja, es que no son recomendados en ambientes donde hay fuentes de radiación electromagnética. Se pueden obtener diferentes tipos de

encapsulado dependiendo de si se necesita poner conectores en ambos extremos, o si solo es necesario usarlo como una sonda [45]. La Ilustración 15 muestra un sensor FBG con encapsulamiento metálico para la medición de temperatura absoluta.

### Arreglos de Sensores de temperatura FBG

Por último, se presentan los arreglos de sensores de temperatura FBG. Este tipo de sensores consiste en el posicionamiento de varios sensores FBG a lo largo de una misma fibra óptica, esto es ideal para mediciones a distancias que estén separadas haciendo uso de un solo cable. Para este tipo de sensores, se pueden seleccionar además de las características ópticas como en el caso de los demás sensores, su distribución en la fibra, de tal modo que se pueden utilizar para medir variables en los puntos de interés a lo largo de una misma fibra óptica [46]. La Ilustración 16 muestra un arreglo de sensores FBG de temperatura donde se observa que este tipo de sensores puede tener una longitud de varios metros para la aplicación en largas distancias.



Ilustración 16. Arreglo de dos sensores de temperatura FBG.

## Capítulo 2. Sistemas de interrogación

En el anterior capítulo se presentaron las características más importantes de las redes de Bragg y sus aplicaciones como sensores de temperatura. En este capítulo se presentan los sistemas de interrogación, los cuales son los que llevan a cabo la interpretación y almacenamiento de las mediciones tomadas por las redes de difracción de Bragg usados como sensores ópticos. Este capítulo está dividido en 2 partes: la primera presenta los conceptos básicos de un interrogador óptico, y algunas técnicas usadas por los sistemas de interrogación. En la segunda parte del capítulo se presenta el interrogador de fibras SM125, el cual fue el sistema de interrogación óptica usado para la realización de este trabajo.

### 2.1 Interrogadores ópticos

Para poder llevar a cabo el objetivo de este trabajo fue necesario comprender todos los actores que hacen parte de un sistema de medición de temperatura utilizando sensores del tipo FBG. Para entender cómo se realiza la medición de temperatura mediante el uso de las redes de difracción de Bragg se puede dividir el sistema en dos partes. La primera parte, son los sensores FBG, los cuales se encargan de detectar los cambios de la variable y convertirla en cambios de la señal en la longitud de onda. La segunda parte, es referente a la interpretación de las señales detectadas para transformarlas en la información obtenida del proceso de medición y visualizarla de la manera deseada. Esta etapa comprende la detección de la señal reflejada por el sensor, así como su interpretación, visualización y almacenamiento. De tal modo, los interrogadores ópticos son los sistemas encargados de la lectura y procesamiento de la medición mediante la integración de la óptica y electrónica [30].

Los sistemas de interrogación por detección óptica básicamente están compuestos de tres bloques principales: el bloque emisor, el bloque de adquisición y análisis de señales y, un bloque de visualización. Cada bloque tiene una configuración y dependiendo de ésta es posible tener diferentes esquemas de interrogación [24]. La Ilustración 17 muestra un esquema de interrogación básico.

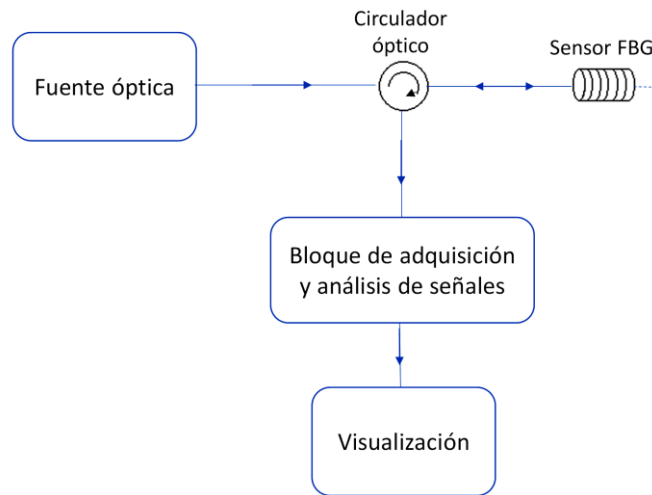


Ilustración 17. Esquema básico de un sistema de interrogación óptica.

Los sistemas de interrogación se pueden clasificar en 2 tipos: esquemas de interrogación pasiva y esquemas de interrogación activos. Los sistemas de interrogación pasivos se caracterizan porque no tienen involucrados componentes de potencia en la etapa de detección. Mientras que los esquemas de interrogación activa basan su detección en dispositivos con alimentación externa, por ejemplo aquellos que requieren de filtros sintonizables [47].

A continuación, se presentan tres esquemas de implementaciones de sistemas de interrogación, los cuales se destacan por tener una resolución aceptable para aplicaciones comunes de medición de temperatura, bajo costo de los componentes del sistema, facilidad de selección de la tasa de adquisición y simplicidad de implementación.

El primer esquema de interrogación es el de filtro de bordes. En este tipo de sistema se utiliza un filtro de borde para obtener la potencia de la señal de salida en función de la longitud de onda central del pico. En la Ilustración 18 se muestra un diagrama de bloques de este sistema. Este sistema se compone de una fuente de luz de ancho espectro. Luego, el circulador óptico dirige el haz de luz al sensor FBG que refleja una longitud de onda en particular, la cual es dirigida de nuevo por el circulador óptico al bloque de detección de picos. En el bloque de detección se tiene un divisor de potencia para recuperar la potencia del pico reflejado. La relación de acoplamiento del divisor de potencia se selecciona de acuerdo con las pérdidas del sistema y la escala de potencia que son capaces de detectar los receptores. La salida de potencia más alta del divisor es tratada mediante un filtro de borde, mientras que la señal de potencia más baja se toma como la señal de referencia. La potencia de la señal de salida del filtro está dada en función de la longitud de onda central del pico, a continuación, la señal de referencia como la señal filtrada son detectadas por dos receptores. Las corrientes de salida del receptor se comparan para

obtener la longitud de onda central del pico utilizando la relación entre estas dos variables [48].

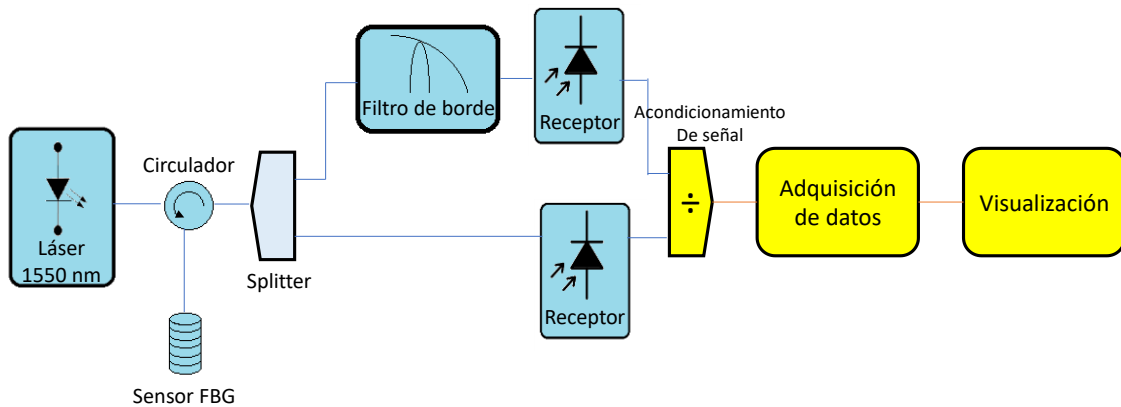


Ilustración 18. Diagrama de bloques para el sistema de interrogación por filtro de bordes. Adaptado de [48].

El segundo esquema se compone por una fuente de ancho espectro, un circulador óptico, dos redes de difracción de Bragg y el bloque de adquisición de datos. En la Ilustración 19 se muestra el esquema del sistema. Las dos redes de difracción implementadas en este sistema se utilizan así: Una de las redes de difracción se utiliza como referencia (FBGR) y se mantiene en un ambiente controlado, mientras que la otra red de difracción se utiliza para realizar la medición (FBGM), por lo cual, esta red de difracción está expuesta a los cambios ambientales. Por último, la señal transmitida por la red de difracción de referencia se caracteriza en el bloque de adquisición de datos [49].

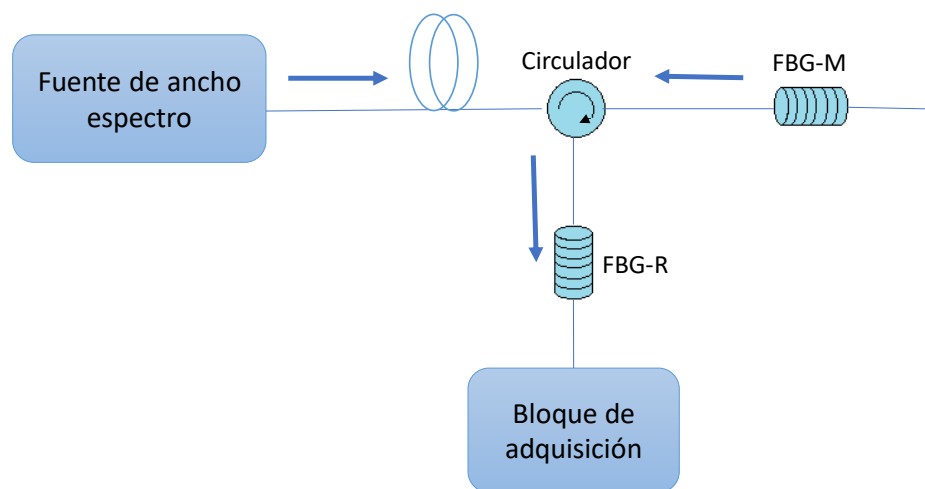


Ilustración 19. Diagrama de bloques para el sistema de interrogación de doble FBG. Adaptado de [49].

La fuente de ancho espectro se puede implementar utilizando un láser Fabry Pérot, el cual emite una señal óptica que se propaga través de la fibra hasta llegar al circulador óptico, luego la señal óptica cruza a través del segundo puerto del circulador óptico hacia el FBGM. El FBGM refleja una señal a una longitud de onda particular, y esta señal fluye de nuevo a través del circulador óptico al tercer puerto hacia el FBGR. En este sistema, la señal analizada es la señal transmitida, la cual corresponde a la señal reflejada del FBGM y filtrada con la longitud de onda central del FBGR. Por último, el bloque de adquisición de datos utiliza la potencia óptica de esta señal para determinar una medida correspondiente de temperatura, deformación o la variable que se desea caracterizar [49].

Para el caso cuando los dos FBG estén en las mismas condiciones exactas, y además ambos sensores tengan la misma longitud de onda central, el proceso de filtrado provocará que la señal pierda la mayor parte de su potencia. A medida que la FBG de detección comience a variar debido a cualquier perturbación externa, la longitud de onda de Bragg se comienza a mover, y producto de este cambio, se obtendrá diferentes valores de potencia óptica en el bloque de adquisición de datos [49].

El tercer esquema es un sistema de interrogación con una plataforma que utiliza una FPGA con una máquina de RISC avanzada (ARM). El sistema se compone de: una fuente de ancho espectro, un fuente sintonizable Fabry-Perot (filtro F-P), un filtro óptico, un fotodetector, un conversor ADC y un driver DAC, un filtro de peine y una placa FPGA y una maquina RISC avanzada [50]. La Ilustración 20 representa el diagrama esquemático del sistema interrogador.

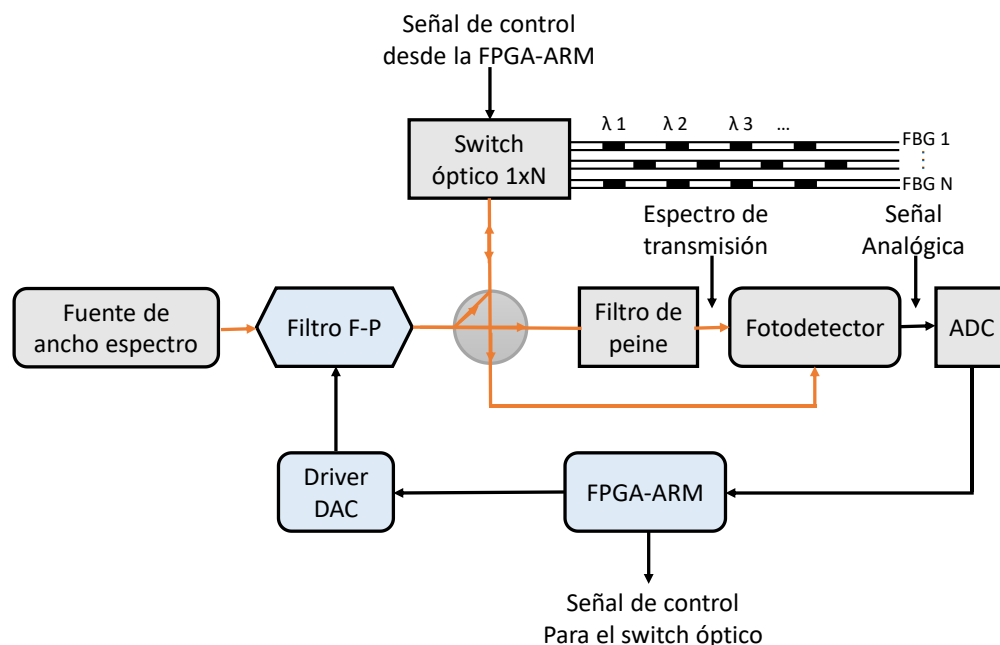


Ilustración 20. Diagrama esquemático del sistema de interrogación con una plataforma FPGA-ARM. adaptado de [50].



El sistema de interrogación se divide en 2 partes, óptica y eléctrica. Al observar la parte óptica, la fuente de ancho espectro emite una señal que entra al filtro sintonizable F-P. Acto seguido, el filtro convierte la luz de ancho espectro a un solo espectro de longitud de onda que incide tanto en los sensores FBG como el filtro de peine. Al analizar la parte eléctrica, la plataforma FPGA + ARM se encarga de generar una señal de tensión encargada de accionar el filtro sintonizable F-P. La resolución del filtro es determinada por la tensión de exploración debida a la rampa proveniente de la FPGA+ARM [50].

El principio de interrogación que se aplica en este sistema se basa en el principio de filtro sintonizable Fabry-Perot, el cual es reportado como uno de los métodos más utilizados por su simplicidad y alta precisión. Este sistema de interrogación contrasta los espectros de reflexión de un sensor FBG con el espectro de transmisión proveniente del filtro de peine, y así lograr interrogar las longitudes de onda centrales. El filtro de peine se utiliza para compensar el error de reflexión del sensor FBG debido al efecto de la temperatura. Adicionalmente, la plataforma FPGA+ARM le otorga al sistema de interrogación alta precisión y una mayor velocidad de procesamiento. Por último, para poder interrogar los sensores a gran escala se utiliza un switch óptico controlado por la plataforma FPGA+ARM, de este modo se logran obtener los espectros de los sensores FBG mediante la multiplexación por división de tiempo (TDM) [50].

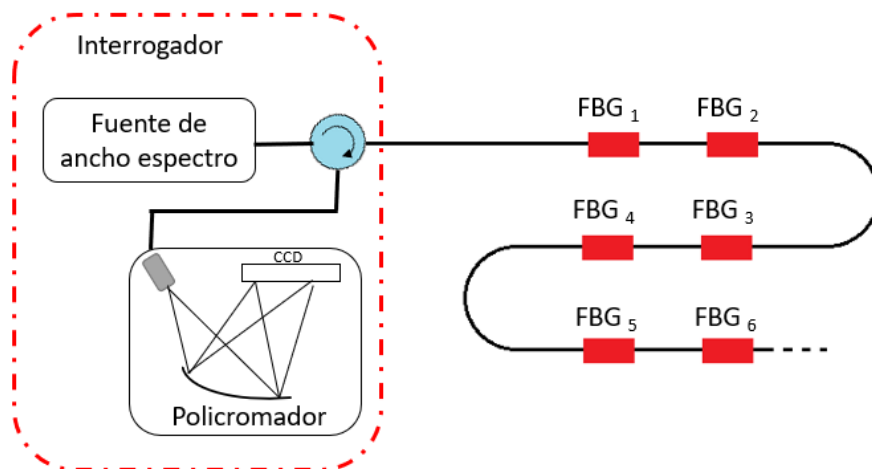


Ilustración 21. Esquema de un sistema de interrogación basado en un policromador. Adaptado de [51].

El último esquema de interrogación es basado en policromadores. Esta técnica utiliza una fuente de ancho espectro para iluminar uno o más sensores FBG, y mide simultáneamente el espectro de reflexión completo de los sensores mediante el uso de una red de difracción que realiza la proyección espacial de los componentes espectrales en un sensor de imagen CCD (CCD siglas en inglés de “dispositivo de carga acoplada”). En la Ilustración 21 se muestra la configuración básica de un sistema de interrogación basado en un

policromador. Los sistemas de interrogación basados en policromadores presentan un alto desempeño en mediciones dinámicas debido a que de manera simultánea se realizan la medición de todo el espectro reflejado [51].

## 2.2 Sistema Interrogador fibras sm125

En cualquier sistema de medición utilizando sensores de fibra óptica es importante determinar el sistema de interrogación que se utilizará, buscando que este sea fiable y en el caso particular de este trabajo, que permita realizar la medición de un arreglo de sensores FBG. De esta forma, el sistema de interrogación a utilizar debe cumplir con las siguientes características:

- **Confiabilidad:** El sistema permite garantizar la repetibilidad y garantizar la fiabilidad en procesos de caracterización y medición de sensores FBG.
- **Comunicación:** El sistema de interrogación debe ser capaz de comunicarse mediante el uso de algún puerto y/o protocolo de comunicación a un computador portátil para visualizar las mediciones en tiempo real y a su vez permitir almacenar los datos medidos a una frecuencia determinada.
- **Robustez:** Debido a que este trabajo pretende realizar la implementación de un prototipo en campo, el sistema de interrogación debe poder ser fácilmente transportado, instalado e implementado en ambientes hostiles.

Al considerar las anteriores características, el sistema de interrogación seleccionado fue el Interrogador óptico de fibras SM125, el cual fue desarrollado por el fabricante Micron optics. Este es un equipo certificado, por lo cual brinda las garantías para realizar mediciones fiables, es fácil de transportar y de implementar en diversos ambientes. Este equipo contiene un láser sintonizable el cual hace un barrido en las longitudes de onda que van desde 1520 nm hasta 1570nm. La señal atraviesa un circulador óptico el cual dirige las señales emitidas a los sensores ópticos, y además también se encarga de dirigir el espectro reflejado por los sensores FBG al filtro sintonizable. El filtro sintonizable Fabry-Perot se encarga de detectar los picos de las longitudes de onda reflejadas por los sensores. Mediante un procesador interno, el interrogador óptico es capaz de comunicarse con un equipo de cómputo mediante el protocolo de comunicación TCP/IP. En el equipo de cómputo mediante el software ENLIGHT se puede realizar la visualización de las señales reflejadas, se pueden personalizar algunos parámetros y almacenar los datos en el computador.

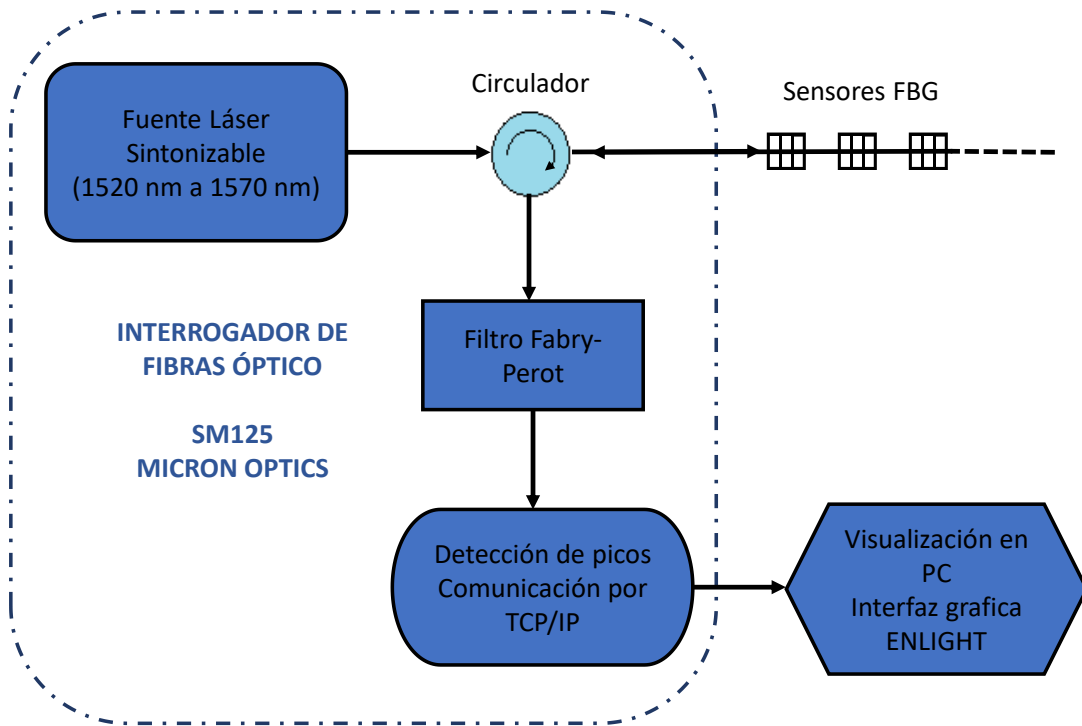


Ilustración 22. Esquema del sistema interrogador SM125.

La Ilustración 22 presenta el esquema del sistema interrogador SM125. El interrogador óptico de fibras SM125 ha sido probado y validado como un sistema de interrogación confiable, robusto, que permite realizar mediciones a largo plazo y ser implementado en aplicaciones de grado industrial [52]. Por lo anterior, el interrogador SM125 cumple con las características requeridas para el desarrollo de este trabajo.

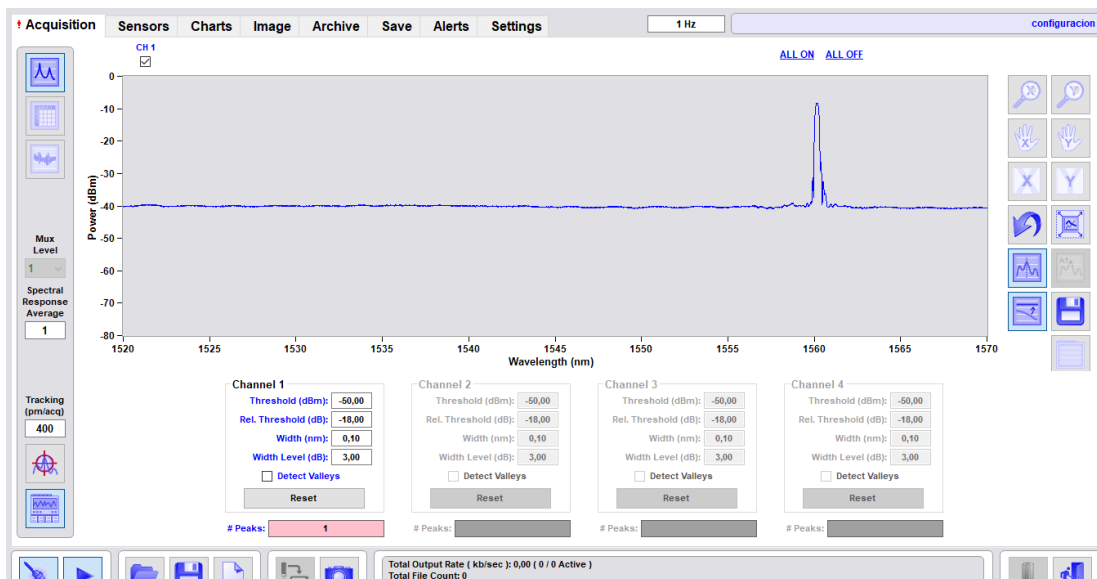


Ilustración 23. Interfaz gráfica del software ENLIGHT.

Para la adquisición de datos y almacenamiento, se cuenta con la interfaz ENLIGHT. La cual permite la detección de picos, y la visualización del espectro de reflexión de los sensores. También tiene la vista de tabla, la cual relaciona los picos detectados en una tabla de longitudes de onda y potencia detectada. Adicionalmente, presenta la vista de la variación de un pico detectado en el tiempo. La interfaz permite personalizar algunos parámetros, como la potencia de umbral de detección de picos, entre otros. En la pestaña “Save”, la interfaz permite configurar algunas características como el máximo tamaño de los archivos a guardar, o dejarlos sin límites y la carpeta de destino, entre otros. Los datos se guardan en un archivo de texto plano, en el cual se almacenan las longitudes de onda de los picos detectados con sus correspondientes potencias detectadas a una frecuencia de 1Hz, es decir, se guardan datos cada segundo. Una vez finalizada la medición, se pueden, abrir, ver y analizar los datos almacenados en la aplicación de preferencia tan solo importándolos en el documento de texto generado. La Ilustración 23 muestra la interfaz del programa ENLIGHT.

## Capítulo 3. Diseño del prototipo del sistema de medición

La primera parte de este capítulo se centra en determinar el lugar físico donde se realizarán las pruebas de la implementación en un arroyo real. La segunda parte es acerca del diseño del sensor multipunto FBG que cumpla con todas las características necesarias, y que dará como resultado las especificaciones de fabricación, para que pueda ser implementado en un sistema prototipo en la medición de variaciones espaciotemporales de temperatura en un arroyo de montaña colombiano.

### 3.1 Determinación de las condiciones físicas del arroyo

Para la implementación del prototipo a desarrollar, es importante determinar el lugar donde se realizarán las mediciones. Para tal fin, se consideran zonas aledañas a la región cundiboyacense debido a su proximidad a la ciudad de Bogotá, y a su topografía. La región seleccionada es la vereda de Puente de Boyacá, del pueblo Ventaquemada, la cual cuenta con varios cuerpos de agua que cumplen con las características deseadas.

Una vez seleccionada la región, se realizó una inspección de campo en búsqueda de arroyos/quebradas donde se pudiera implementar el prototipo, para lo cual se consideraron los siguientes aspectos:

- Seguridad: Esta vereda en términos de seguridad, es una región históricamente vigilada por la fuerza pública y es muy segura debido a su importancia en la historia del país. Lo cual para nuestra implementación es deseable, debido que se transportan e instalan equipos y componentes de mediana cuantía, por lo cual seleccionar una zona segura era un factor relevante
- Acceso al sitio: se buscó que el sitio seleccionado pudiera tener al menos una vía de acceso terciaria en un radio menor de 1 km de distancia. Debido a que para la implementación se requería el transporte de equipos de medición, herramientas, planta generadora de energía, carpas, y otros elementos necesarios para la implementación del prototipo de pruebas. Adicionalmente era necesario contar con una vía

de acceso en caso de que algún miembro del personal colaborador requiriera asistencia médica.

- Viabilidad de la instalación: En este aspecto era clave evitar zonas inestables, corrientes demasiado caudalosas, cuerpos de aguas demasiado turbios que no permitieran visualizar la ubicación de los sensores, tramos con pendiente elevada que representen riesgo a la integridad de los instaladores, tramos con densa vegetación que representara riesgos tanto para el personal como para los equipos, y componentes del sistema.
- Zonas de interés: como se explicó en el marco teórico, la zona hiporreica es una zona sedimentada, la cual posee un flujo continuo de agua, y aunque en principio se puede encontrar a lo largo de un cuerpo de agua, es más proclive a desarrollarse en los siguientes escenarios: dunas, escalones, cajones y tramos sinuosos.

Teniendo en cuenta las características antes mencionadas, se buscó un arroyo poco profundo, de preferencia de aguas cristalinas que tuviera algunas de las zonas de interés enunciadas anteriormente. La Ilustración 24 presenta 3 tramos diferentes de posibles arroyos de montaña donde se podría implementar el sistema de medición de temperatura.



Ilustración 24. Arroyos de interés.

Es de aclarar, que el sistema a diseñar se podría instalar en largas distancias (decenas de kilómetros), pero por cuestiones logísticas, y debido a que se pretende instalar un prototipo, se buscó que el lugar de la instalación tuviera varios puntos de interés y que no se encontraran muy distanciados. Al hacer el recorrido por los sitios de interés, se seleccionó el tercer arroyo porque



cuenta con tramos sinuosos (curvas), escalones y cajones a lo largo de su trayectoria. Adicionalmente, el arroyo cumple con el acceso a una vía terciaria a menos de 1 km de distancia. Adicionalmente, aunque para llegar a la ubicación del arroyo es necesario transitar por zonas empinadas, es seguro el trayecto para transportar equipos y demás instrumentos requeridos en la implementación.

Una vez seleccionado el arroyo, se realizó un recorrido para encontrar la ubicación del sistema de medición. Para esta parte se identificaron posibles sitios de interés como los reportados en la Ilustración 25.



Ilustración 25. Posibles puntos de interés en el arroyo seleccionado para las pruebas.

Una vez finalizado el recorrido, se analizaron los posibles puntos de interés en los diferentes tramos del arroyo. Se buscó el tramo que contuviera al menos 3 puntos de interés y que fuera viable realizar la instalación de los sensores sin un mayor riesgo para los sensores ni el instalador de estos. Además, era necesario que entre estos puntos hubiera un camino transitable para extender la fibra entre ellos, por lo cual terrenos intermedios con vegetación densa no eran deseados. Otro punto a tener en cuenta era la necesidad de un espacio plano aledaño a la ladera del cuerpo de agua que al menos tuviera un área de 2.5 m x 5m, donde ubicar la carpa de los equipos de medición, la planta generadora de energía, y el campamento de la persona encargada de las

mediciones. Para finalizar, el tramo donde se realizó la instalación no debía ser accesible al tránsito de ganado, debido a que estos representan un potencial peligro a la integridad de los sensores, instrumentos y la zona de interés en sí. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los 3 puntos de interés seleccionados:

El primer punto de interés, se presenta en la Ilustración 26, el cual se seleccionó ya que en este tramo el cuerpo de agua está próximo a una curva pronunciada, de esta manera el agua de la superficie tiene un sentido, mientras el agua que fluye en el subsuelo va en diagonal con respecto a este, puesto que el agua en el subsuelo recorta la curva. De este modo, la dirección de los fluidos al ser distinta presenta un punto de interés en los intercambios llevados en la zona hiporreica en esta ubicación. En adición, la ladera al costado derecho de la imagen presenta un terreno plano donde se puede realizar la instalación de la carpa de los equipos y el campamento para la medición.



Ilustración 26. Ubicación del primer sensor FBG.

La segunda ubicación para el sensor FBG se presenta en la Ilustración 27. Esta ubicación es seleccionada debido a que en este punto el cuerpo de agua tiene un comportamiento bastante interesante, esto debido a que como se observa en la ilustración, el punto de interés viene antecedido de varios escalones de agua que además transcurren en una doble curva, por lo cual toda esta región tiene elementos que son proclives para el favorecimiento de intercambios entre el agua en su superficie con el subsuelo.





Ilustración 27. Ubicación del segundo sensor FBG.

La tercera ubicación para el sensor FBG, es el escalón observado en la Ilustración 28. Se seleccionó esta ubicación, debido a que los escalones son zonas de interés para favorecer la zona hiporreica. Adicionalmente, pocos metros antes de la ubicación se une al cuerpo de agua un pequeño arroyo, lo que hace que el primer escalón después de este evento sea interesante como objeto de análisis.



Ilustración 28. Ubicación del tercer sensor FBG.

Un factor clave para el diseño de los sensores FBG son las distancias entre los sensores y, entre el primer sensor y el lugar donde se alojará el sistema de interrogación. Por lo cual se realizaron las siguientes mediciones:

Distancia entre el primer y segundo sensor en el arroyo: 14.5 m

Distancia entre el segundo y tercer sensor en el arroyo: 6.5 m

Sin embargo, hay tramos que representan riesgos para la integridad de los sensores y la fibra óptica debido a que hay partes en la ladera que presentan riesgo de derrumbe. En la Ilustración 29, claramente se observa en la parte derecha de la ladera que ha habido derrumbes, y en la parte más al fondo de la misma, se presenta una grieta entre la pared de la ladera, lo cual representa un alto riesgo de derrumbe.



Ilustración 29. Ladera del arroyo con riesgo de derrumbe.

Por lo anterior, para mitigar estos riesgos, solo la fibra cercana al sensor FBG quedó expuesta en el cuerpo de agua, y se planteó realizar la conexión entre los 2 sensores sacando la fibra óptica del arroyo a la parte superior de la ladera, lo cual implica un recorrido más largo, pero a la vez más seguro para la integridad de la fibra. Para esto, se realizó la medición desde los puntos de interés, donde hay que subir la fibra a la parte alta de la ladera (la pared alcanza aproximadamente 2 metros en su parte más alta con respecto al cuerpo de agua): de este modo, las distancias a considerar fueron las siguientes:

Distancia entre el primer sensor y la ubicación del interrogador: 4 m



Distancia entre el primer y segundo sensor, trayecto por encima de la ladera:  
21 m

Distancia entre el segundo y tercer sensor trayecto por encima de la ladera:  
8.5 m

La ubicación geográfica precisa de este arroyo es en las montañas boyacenses del pueblo de Ventaquemada en la vereda de Puente de Boyacá con las coordenadas de  $5.439495^\circ$  en latitud Norte y  $73.432504^\circ$  en longitud Oeste. En la Ilustración 30 se presenta la ubicación vía satélite en Google Maps.



Ilustración 30. Ubicación satelital del lugar de la implementación.

### 3.2 Diseño del sensor multipunto

Una vez determinadas las condiciones físicas del arroyo, y la cantidad de puntos de interés, fue posible realizar el diseño de los sensores FBG a utilizar.

Para el diseño se tomaron en consideración las siguientes especificaciones:

- Selección de longitudes de onda central para los sensores: las longitudes de onda centrales a utilizar dependen directamente del rango de operación del sistema de interrogación. A revisar la hoja de datos del interrogador, el sistema es capaz de interrogar arreglos de sensores FBG que tengan sus longitudes centrales entre 1520nm y 1570 nm.

- Cantidad de sensores: En total se requieren mínimo 6 sensores FBG, debido a que cada punto de interés requiere 2 sensores: un sensor en la parte superficial y otro sensor que se entierra en el subsuelo.
- La conectividad del sensor: Los sensores deberán tener conectores FC/APC para poderse conectar con el interrogador óptico SM125. los conectores insertan pérdidas entre 0.3 dB a 0.75 dB típicamente.
- Fibra óptica: Se requiere fibra óptica monomodo. Para las especificaciones la cantidad de fibra óptica debe tener una longitud que satisfaga las distancias de posicionamiento especificadas en la anterior sección de este capítulo.
- Especificaciones técnicas de desempeño: Se requiere que los sensores tengan una alta reflectancia (Ref), Relación de supresión de los lóbulos laterales (SLSR) mayor a 10 dB, para que se puedan identificar fácilmente las longitudes centrales y por medio del software ENLIGHT establecer el umbral por encima de los picos debidos a los lóbulos laterales. Este parámetro nos indica, que el tipo de FBG inscrito va a ser apodizado. Por último, el ancho de banda del espectro reflejado por el FBG (BW) debe ser angosto, esto con el fin de que en un futuro se pueda optimizar el uso de la mayor cantidad de sensores FBG en la banda de trabajo del interrogador.

De acuerdo con lo anterior, se establecen las siguientes especificaciones para los sensores FBG que cumplen con las características antes mencionadas.

Se decidió hacer varios arreglos que contengan 2 sensores FBG, con la finalidad que los sensores no queden sujetos a solo ser implementados en este tramo del arroyo, sino que se puedan implementar en trabajos futuros en otro tramo de este arroyo, o en otro arroyo de interés. Se hicieron arreglos de 2 sensores porque para la medición de las variaciones de temperatura se necesita posicionar en una misma ubicación un sensor en el subsuelo y otro sensor en el agua superficial.

Así, se decidió realizar 4 arreglos de 2 sensores FBG cada uno. La razón de hacer un arreglo adicional al requerido por los sitios de interés es el gran riesgo existente en la instalación y durante la medición debido a factores como la manipulación, accidentes naturales, daños ocasionados por animales, entre otros. Adicionalmente, teniendo en consideración el anterior escenario, se decidió que todos los sensores tuvieran las mismas especificaciones técnicas y de dimensiones a excepción de la longitud de onda, las cuales son determinadas para el escenario donde se presenta mayor distancia entre el primer y segundo sensor.

Para garantizar la medición absoluta de temperatura, se requieren sensores FBG con encapsulado metálico inmunes a la deformación para obtener mediciones fiables en el trabajo. La razón para escoger este encapsulado, como se presentó en los distintos tipos de sensores comerciales del capítulo1: Marco teórico, es que este tipo de empaquetado es el que representa mayor

protección al sensor en ambientes hostiles. El tipo de sensor FBG comercial seleccionado fue el sensor T830 de la empresa TECHNICA OPTICAL COMPONENTS, el cual es un sensor para la medición absoluta de temperatura de alta precisión, con encapsulado metálico apto para ser utilizado en ambientes hostiles. De este modo las especificaciones técnicas que comparten los 8 sensores son las siguientes:

$BW = 0.3\text{nm} \pm 0.05\text{nm}$

Ref > 70%

SLSR > 15dB

Tipo de fibra: smf28c (fibra monomodo)

Conectores: FC/APC

A continuación, se presentan las características de cada arreglo de sensores:

Construcción del arreglo modelo 1 con sensores T830:

Conector FC/APC – 12 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1525nm -  
1 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1530nm - 12 m de fibra smf28c  
- Conector FC/APC

Construcción del arreglo modelo 2 con sensores T830:

Conector FC/APC - 12 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1545nm -  
1 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1550nm - 12 m de fibra smf28c  
- Conector FC/APC

Construcción del arreglo modelo 3 con sensores T830:

Conector FC/APC - 12 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1560nm -  
1 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1565nm - 12 m de fibra smf28c  
- Conector FC/APC

Construcción del arreglo modelo 4 con sensores T830:

Conector FC/APC - 12 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1535nm -  
1 m de fibra smf28c – Sensor T830, con WLC: 1540nm - 12 m de fibra smf28c  
- Conector FC/APC

Para realizar la conexión en serie de los sensores para este trabajo se requiere de al menos 2 enfrentadores ópticos tipo FC/APC a FC/APC monomodo.

El costo de fabricación de los 4 arreglos, que contienen en total 8 sensores FBG, anteriormente descritos y los enfrentadores ópticos fue de US 1,171,00.

Incluyendo los costos de envío. La Ilustración 31 muestra los 4 sensores ya fabricados por la empresa TECHNICA OPTICAL COMPONENTS.

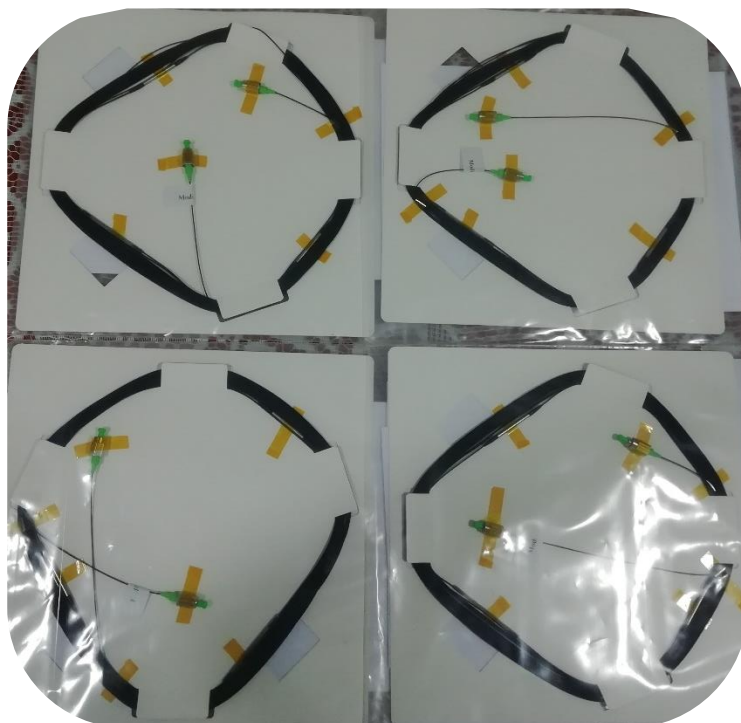


Ilustración 31. Arreglos de sensores FBG diseñados.

## Capítulo 4. Resultados y Análisis

Este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y la implementación realizada del prototipo de medición en un tramo de arroyo de montaña, así como el análisis de los resultados obtenidos.

La primera parte del capítulo se centra en la caracterización de temperatura de los arreglos de sensores FBG que dará como resultado las ecuaciones características de cada uno de los sensores. La segunda parte presenta los resultados obtenidos en la prueba del prototipo en el laboratorio de Ensayos Hidráulicos, en la cual se corrobora que los sensores FBG diseñados y sumergidos en agua son inmunes a variaciones de nivel y flujo. La tercera parte se centra en la implementación del prototipo en un tramo de arroyo de montaña ubicado en el departamento de Boyacá, pueblo de Ventaquemada, vereda de Puente de Boyacá. Para finalizar, se presentan los análisis de los resultados obtenidos en la implementación y trabajos futuros en esta área.

### 4.1 Caracterización de la red de sensores



Ilustración 32. Esquema para caracterizar la red de sensores FBG de temperatura.



Para la caracterización de temperatura de la red de sensores FBG, se utilizó el esquema de medición mostrado en la Ilustración 32, el cual está conformado por un horno de temperatura Memmert modelo 30 – 1060, 2 computadores portátiles, un interrogador óptico y los sensores FBG. Este esquema está compuesto de dos partes: la primera parte es el control de paso de temperatura, en la cual un computador se conecta al horno Memmert utilizando el puerto Ethernet. Por medio de programación en Python se lee la temperatura del horno y se establecen pasos de temperaturas de 10°C iniciando a una temperatura de 30°C hasta 90°C. Para garantizar la estabilización de la temperatura se programó que el horno tuviera un tiempo de estabilización de 3 horas para la temperatura de 30°C y para las siguientes temperaturas se programó este tiempo en 2 horas para cada temperatura. La segunda parte es la conexión de los sensores FBG con el sistema de adquisición, donde un computador se conecta al interrogador de fibras óptica SM125 por puerto Ethernet con el fin de adquirir los datos registrados por el interrogador, a su vez el interrogador óptico se conecta a los sensores FBG ubicados dentro del horno. La ubicación de los sensores FBG se presenta en la Ilustración 33.

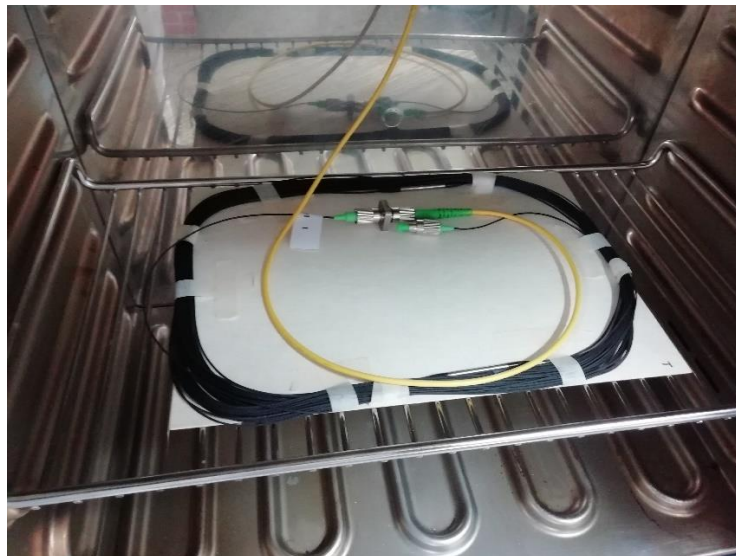


Ilustración 33. Ubicación del arreglo de sensores FBG dentro del horno.

La prueba de caracterización de temperatura tuvo una duración total de 15 horas (900 minutos) y es importante aclarar, que los dos computadores portátiles fueron sincronizados con la misma hora. Para el procesamiento de los datos, primero se obtuvo el perfil de temperatura del horno, para poder contrastarlo luego con las longitudes de onda correspondientes a cada sensor FBG. En la Ilustración 34 se presenta el perfil de temperatura del horno en color azul. Para la caracterización de los sensores FBG se utilizaron los datos obtenidos cuando la temperatura se ha estabilizado con variaciones menores o iguales a 0.1°C. Dichos intervalos se identifican para cada temperatura en la gráfica por líneas paralelas verticales en color negro.



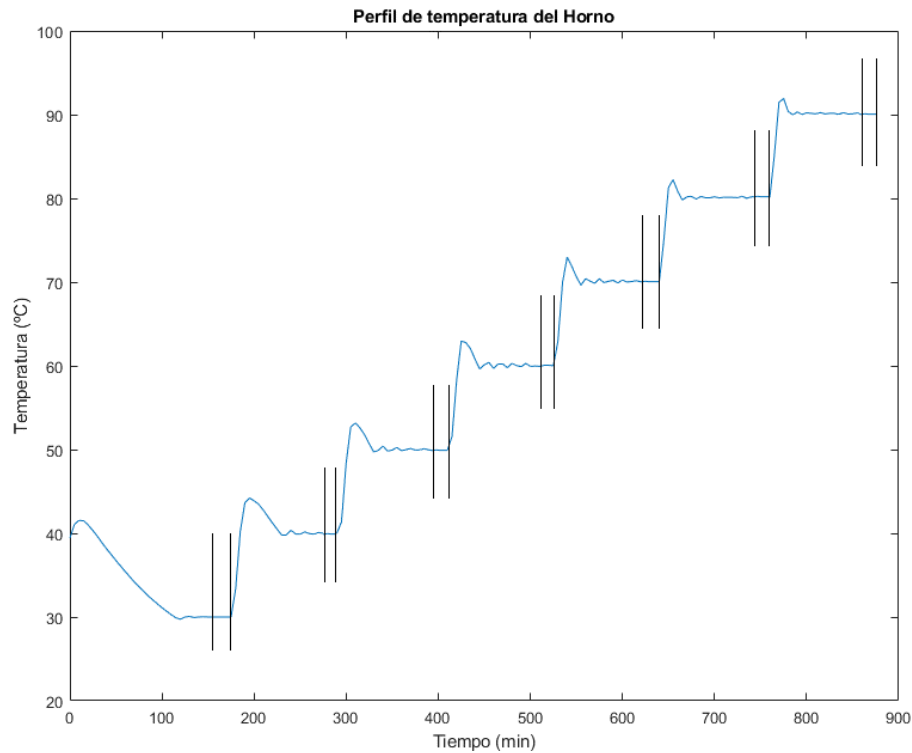


Ilustración 34. Perfil de temperatura del horno usado en la caracterización de los sensores FBG.

Después de identificar los intervalos de tiempo en los cuales la temperatura del horno era estable, se procedió a contrastarlos con los datos obtenidos por el interrogador óptico en los mismos intervalos de tiempo. Luego, se promediaron los datos obtenidos para cada temperatura y de esta manera obtener la caracterización de temperatura para los sensores FBG. A continuación, las ilustraciones 35, 36 37 y 38 presentan las curvas de caracterización de temperatura para cada arreglo de sensores.

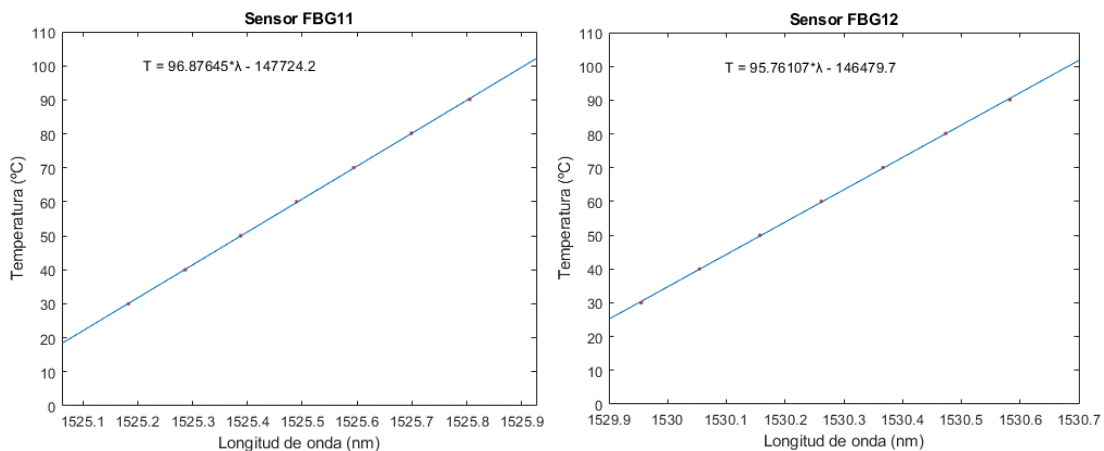


Ilustración 35. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG11 y FBG12.

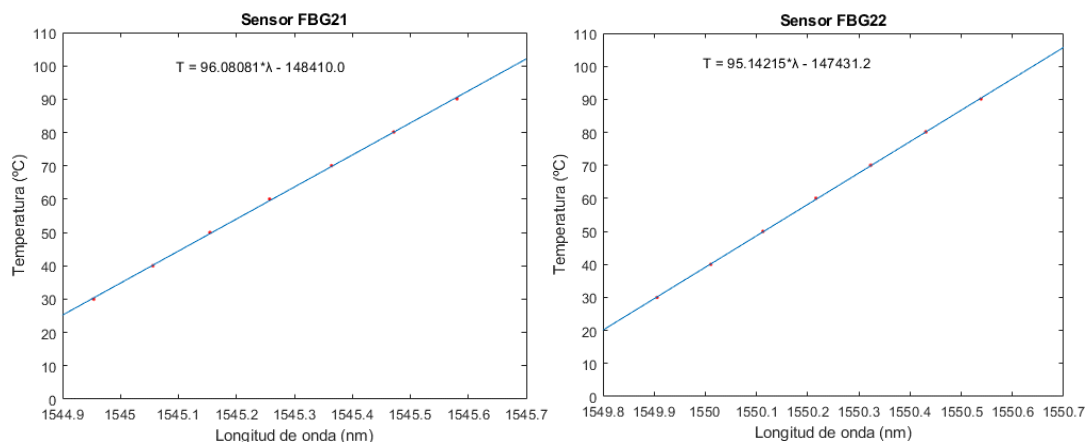


Ilustración 36. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG21 y FBG22.

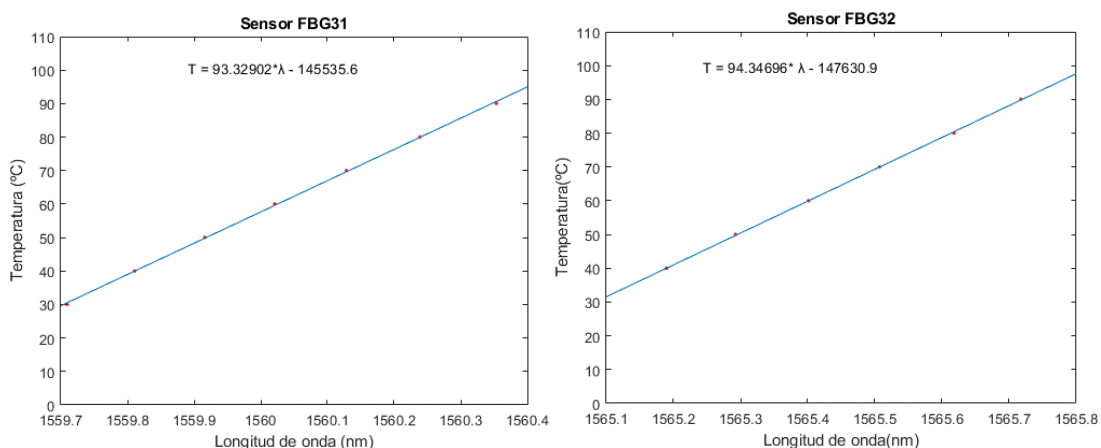


Ilustración 37. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG31 y FBG32.

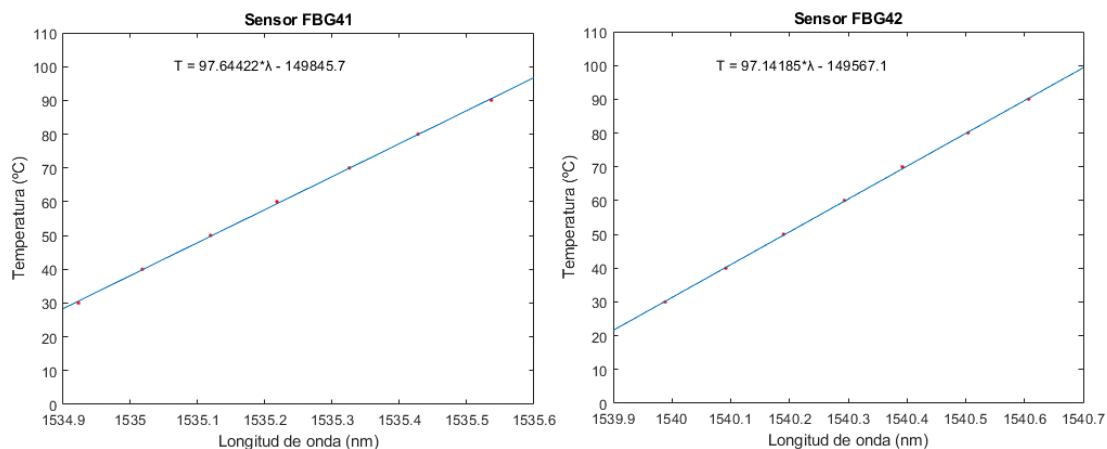


Ilustración 38. Curva de caracterización de temperatura para el arreglo de sensores FBG41 y FBG42.

Al observar las curvas de caracterización de temperatura, se observa que la relación entre temperatura y longitud de onda para cada uno de los sensores tiene un comportamiento lineal. Al realizar la regresión lineal de cada gráfica se obtuvieron las siguientes características con sus respectivos coeficientes de determinación.

FBG11:  $T = 96.8764587123707 * \lambda - 147724.226419477$

$R^2 = 0.999968925292872$

FBG12:  $T = 95.7610738335977 * \lambda - 146479.694626512$

$R^2 = 0.999915733768705$

FBG21:  $T = 96.0808140251657 * \lambda - 148410.024147973$

$R^2 = 0.999861608479936$

FBG22:  $T = 95.1421541685188 * \lambda - 147431.20117411$

$R^2 = 0.999954539473723$

FBG31:  $T = 93.3290215646767 * \lambda - 145535.630804137$

$R^2 = 0.999820518414629$

FBG32:  $T = 94.3469656168811 * \lambda - 147630.875765922$

$R^2 = 0.999943436166365$

FBG41:  $T = 97.6442151143119 * \lambda - 149845.731086939$

$R^2 = 0.999815188541429$

FBG42:  $T = 97.1418524302102 * \lambda - 149567.126024035$

$R^2 = 0.999876312565153$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de Bragg en nanómetros, T es la temperatura en grados Celsius, y  $R^2$  es el coeficiente de determinación. Los coeficientes de determinación  $R^2$  obtenidos para los 8 sensores FBG indican que los modelos obtenidos en cada una de las ecuaciones presentan una buena calidad para la replicación y ajuste de los datos que se obtengan en mediciones futuras.

## 4.2 Prueba del prototipo en el laboratorio de Ensayos Hidráulicos

Para garantizar la fiabilidad de las mediciones de temperatura, se validó que los sensores FBG que componen el prototipo de medición solo registren variaciones dependientes a la variable de temperatura, y ser independientes de variables como nivel o flujo. Para lograr lo anteriormente expuesto, se realizó la prueba del prototipo de medición de temperatura en el laboratorio de ensayos hidráulicos usando un canal de agua cuyo nivel del agua de tanque es controlado por válvulas manuales.

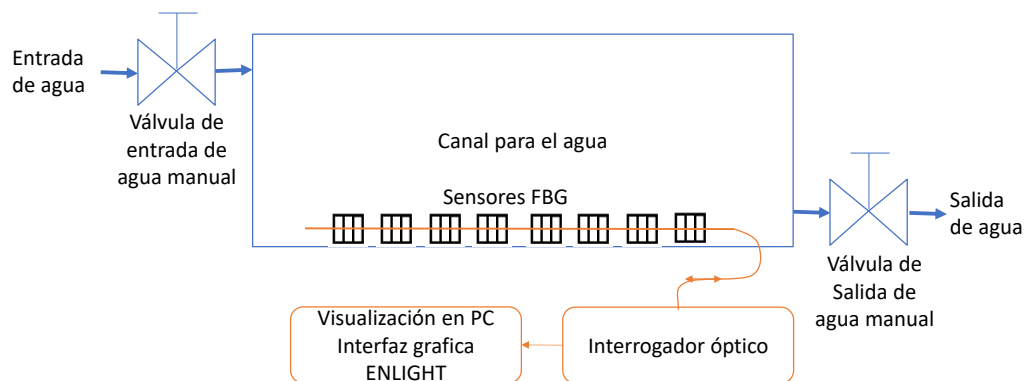


Ilustración 39. Esquema de la prueba de cambio de nivel de agua para el prototipo de medición.

Para esta prueba se utilizó el esquema presentado en la Ilustración 39. El esquema está conformado por 2 partes: la primera parte es el control de nivel en el canal mediante el manejo de 2 válvulas manuales. La primera válvula controla el flujo de entrada de agua al canal, mientras que la otra válvula manual se ubica en el otro extremo del canal, y de esta forma mediante la graduación manual de estas válvulas se puede estabilizar el nivel de agua. La segunda parte del esquema hace referencia a la conexión de los sensores FBG con el sistema de adquisición, el cual es la misma conexión usada en la caracterización de temperatura.

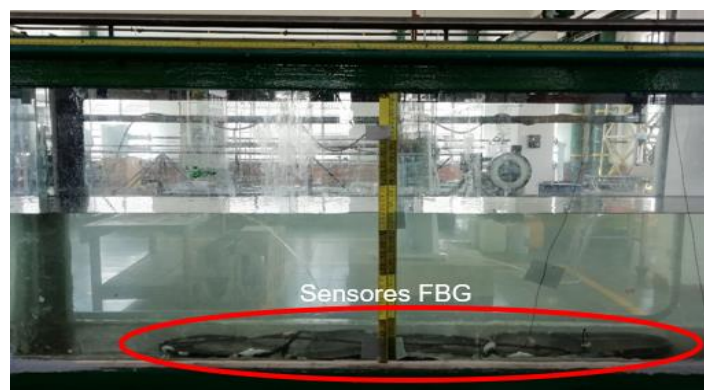


Ilustración 40. Canal de agua con los sensores FBG.

Se estableció realizar la prueba con 5 niveles de agua diferentes en el canal, siendo el mínimo 8 cm y el máximo 54.3 cm. Lo anterior se estableció por las características dimensionales del canal, y porque los puntos de interés donde se estableció realizar la medición tienen una profundidad menor a 30 cm de profundidad, por lo cual, este rango es suficiente para cumplir con el objetivo propuesto por la prueba. Adicionalmente, los sensores FBG fueron conectados en serie y ubicados en el suelo del canal, así como se muestra en la Ilustración 40. Los resultados se muestran en las ilustraciones 41, 42, 43 y 44.

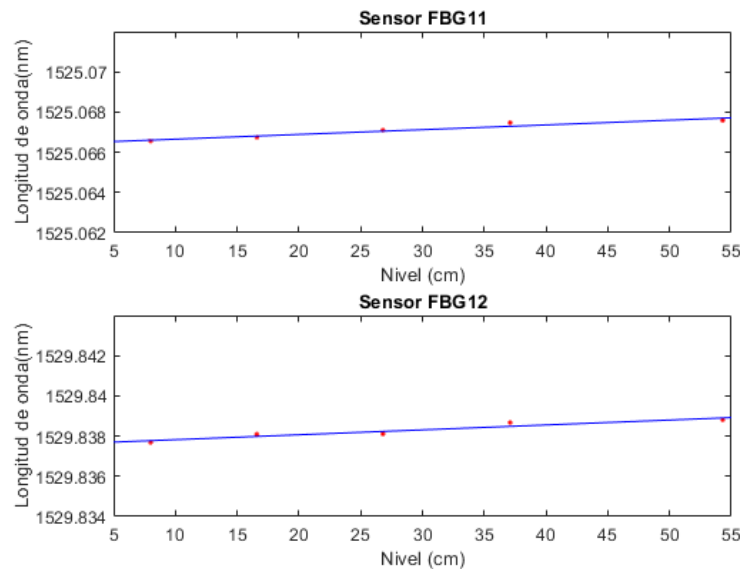


Ilustración 41. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG11 y FBG12.

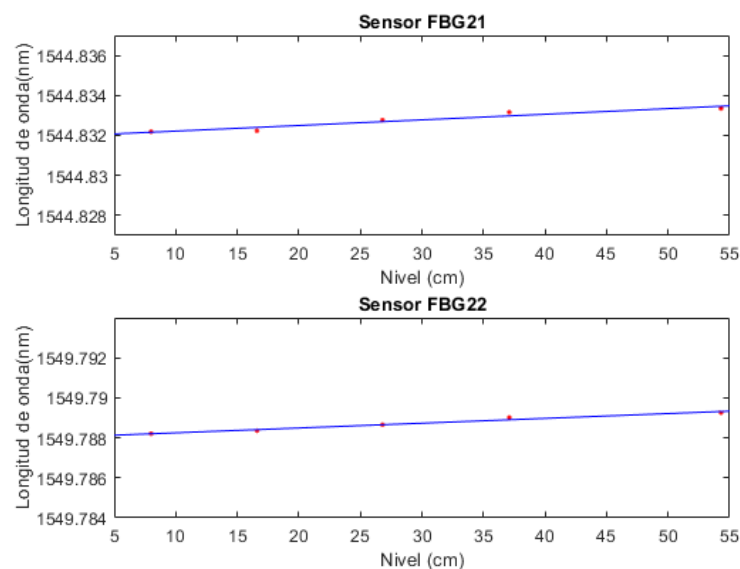


Ilustración 42. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG21 y FBG22.

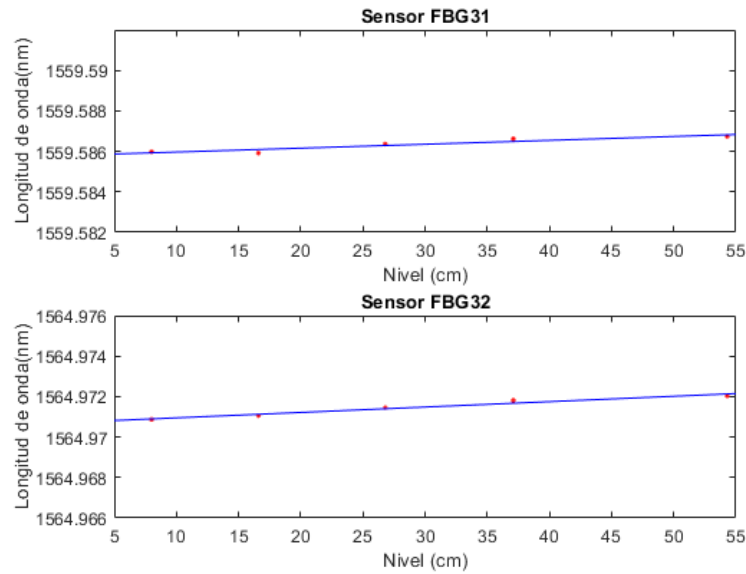


Ilustración 43. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG31 y FBG32.

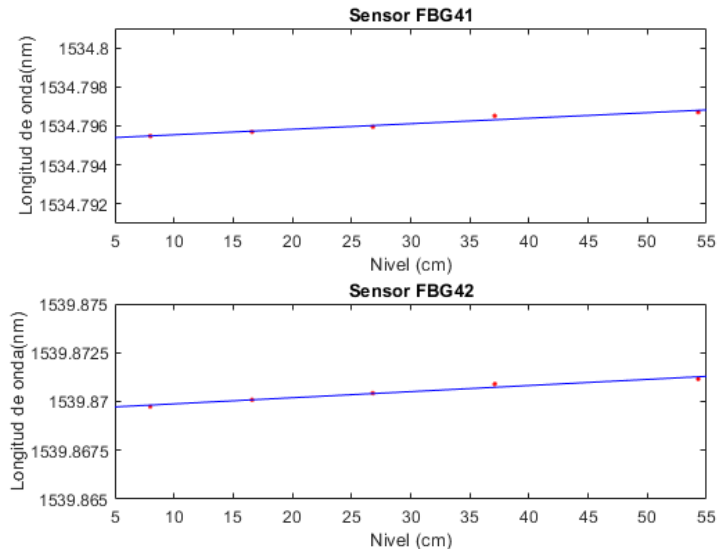


Ilustración 44. Prueba de nivel para para el arreglo de sensores FBG41 y FBG42.

Para la toma de cada medición, se esperó a que el nivel de agua fuera estable, y a partir de este se tomaron mediciones por 3 minutos, es decir, se tomaron 180 datos para cada medición. Como se puede observar en cada una de las gráficas, la pendiente de las curvas de tendencia es mínima. Cuando analizamos el por qué hay una pequeña variación en todas las gráficas, la cual

es inferior a 2 picómetros en todas de ellas, se llega a la conclusión que es por efecto de la temperatura. Como se puede evidenciar en la Ilustración 45, la temperatura al empezar las mediciones en el agua era de  $18.1^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$  y al finalizar las mediciones la temperatura del agua era de  $18.3^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ . Estas mediciones fueron realizadas con un medidor TDS (por sus siglas en ingles Total Dissolved Solids), el cual tiene la capacidad de registrar temperaturas con una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$ .



Ilustración 45. Medición de temperatura en la prueba de nivel del prototipo.

Para finalizar, con el fin de corroborar la variación de las mediciones a diferentes niveles de agua se calculó la desviación estándar de todos los datos registrados para cada sensor, es decir, se utilizaron 900 datos por sensor para realizar este cálculo, los cuales se presentan en la Tabla 1.

Desviación estándar (nm)	
<b>FBG11</b>	0.00079206
<b>FBG21</b>	0.00081780
<b>FBG21</b>	0.00092412
<b>FBG22</b>	0.00083293
<b>FBG31</b>	0.00077824
<b>FBG32</b>	0.00092079
<b>FBG41</b>	0.00088581
<b>FBG42</b>	0.00088402

Tabla 1. Desviación estándar de los datos obtenidos por cada sensor para la prueba de nivel.

Al analizar los anteriores resultados, se puede observar claramente que ninguna desviación estándar supera el 0.001 nm, es decir, que todas las desviaciones estándar halladas están por debajo de 1 pm. Adicionalmente, cabe recordar que la resolución del interrogador óptico es de 1 pm, por lo cual se confirma que las desviaciones estándar halladas en esta prueba están dentro de la incertidumbre del instrumento, y sumado al hecho que se evidenció con las mediciones obtenidas por medidor DTS, se concluye que los sensores FBG que se usaron en este proyecto son independientes a la variación del nivel del agua (para el rango estudiado) y del flujo de la misma, y de esta manera se determina que son aptos y adecuados para la implementación en los puntos de interés seleccionados en este trabajo.

#### **4.3 Implementación del prototipo en un tramo de un arroyo de montaña: Resultados y análisis.**

Para poder realizar esta sección fue necesario realizar 2 implementaciones del prototipo en campo, debido a que en la primera implementación se presentaron inconvenientes que afectaron la ejecución de esta, sin embargo, de esta implementación se adquirió experiencia y consideraciones para la segunda implementación, la cual fue satisfactoria. Para ambas implementaciones del prototipo en campo, fue necesario tener una serie de consideraciones como el suministro de energía, la logística, materiales, permisos e instrumentos y equipos. A continuación, se describirá brevemente cada una de las consideraciones.

**Suministro de energía:** debido a que la zona seleccionada no contaba con un suministro de energía cercano, se optó por seleccionar un sistema de suministro de energía de fácil transporte. Inicialmente se escogió un sistema de suministro de energía alimentado por un arreglo de paneles solares y baterías recargables, sin embargo, debido a las condiciones climatológicas en la primera implementación, se decidió alquilar una planta de energía de gasolina con salidas de tensión de 110 V, la cual tenía una capacidad de almacenamiento de 24 litros. A la salida de la planta de energía se conectó una UPS con el fin que la tensión de entrada a los equipos fuera controlada y tuviera autonomía de algunos cuantos minutos en caso de falla del sistema de suministro de energía. Adicionalmente, como la planta de energía debía ser abastecida entre cada 5 o 6 horas, y por protocolos de seguridad, se debe apagar la planta para el abastecimiento, el uso de una UPS era imprescindible para mantener los equipos funcionando y así poder llevar a cabo esta tarea.

**Logística:** en esta parte se consideraron todos los aspectos referentes a la planeación de la instalación, transporte del equipo de trabajo e instrumentos, distribución de tareas en la instalación y toma de datos, instalación de campamento y desmonte de estos. También se gestionó el acceso a una casa



familiar con el señor Alberto Sosa Torres en la misma vereda para atender las necesidades básicas del equipo de trabajo.

**Materiales:** adquisición de carpas e implementos para acampar, polietilenos, herramientas tales como machete, palas, desarmadores, alicates, así como también insumos como cinta aislante, pitas, linternas, extensiones eléctricas alimentos entre otros necesarios para que el equipo de trabajo pudiera trabajar y mantenerse durante las mediciones. Adicionalmente, eran indispensables los 8 sensores FBG, varios enfrentadores ópticos y el kit de limpieza de fibra óptica.

**Permisos:** se solicitó permiso y aprobación verbal al señor Pedro Álvarez dueño de los predios donde se realizaron las mediciones. Además, se solicitó por escrito permiso a la Universidad Nacional de Colombia para la movilización a campo del equipo Interrogador de fibras ópticas SM 125.

**Instrumentos y equipos:** Planta de energía de la marca Porter Cable de la referencia PCI5000, un interrogador de fibras óptico SM 125, un computador portátil con puerto Ethernet, un UPS con 3 salidas reguladas de 110 V.

### **Primera implementación del prototipo de medición de temperatura**

La primera implementación se realizó entre el 29 de junio hasta el 1 de julio del año 2019. El primer día, se llegó hasta donde lo permitió la vía de acceso en carro hasta unos 500 metros del lugar de instalación. Desde el carro hasta el lugar de medición se llevaron todos los materiales, insumos, herramientas y equipos necesarios donde fue necesario atravesar quebradas, cercas eléctricas, transitando por terreno irregular cuesta arriba, esta actividad tomó cerca de 2 horas. Una vez en el lugar, se procedió a instalar 2 carpas, una para el campamento del equipo de trabajo, y otra para los equipos de medición.

Una vez instalados, se colocaron los equipos de medición dentro de la carpa y se procedió con la instalación de los sensores FBG. Para realizar la instalación de los sensores FBG en los puntos de interés, se decidió realizar una estructura circular en alambre para asegurar los sensores por medio de cinta adherente, y de este modo poder posicionarlos en el punto donde reposará cada arreglo de sensores. Acto seguido, se utilizó un sistema de estacas y tensores para fijarlo a cada lugar de interés.

Como se observó en el capítulo 3, en esta quebrada había varios puntos de interés. Los puntos de interés mostrados en ese capítulo corresponden a la segunda implementación. Sin embargo, para esta primera implementación, aunque se utilizó parte del mismo tramo tratado en el capítulo 3, no se utilizaron los mismos puntos de interés, sino otros, mostrados en la Ilustración 46. Estos puntos fueron seleccionados debido a que presentaban caídas de agua (escalones) o presentaban cambios en la pendiente generando cambios en el flujo y rapidez del agua.



Ilustración 46. ubicación de los sensores FBG en la primera implementación del prototipo.

También en la Ilustración 46, se indica el posicionamiento de los arreglos de los sensores FBG encerrados en círculos rojos, de esta forma el arreglo FBG1 corresponde a la imagen que está a la izquierda de la ilustración, el arreglo FBG3 es el presentado en la imagen del medio, y por último, el arreglo FBG2 se posicionó en la imagen de la derecha de la Ilustración 46. En la misma ilustración, se puede observar cómo se llevó a cabo el uso combinado de estacas y de tensores por medio de lazo negro. Esta tarea presentó un gran desafío, debido a que, si bien los sensores contaban con una estructura básica que les permitía estar en la posición deseada, la fibra óptica que atravesaba desde la estructura hasta la ladera de la quebrada quedaba expuesta a los residuos que transportaba el agua.

Adicionalmente, Colombia y en especial la región Andina para los días seleccionados en la implementación presentaba temporada húmeda, las constantes lluvias afectaron la estructura misma de la quebrada, las paredes de la ladera estaban débiles y esto hacía que el sistema de tensores no fuera eficiente e hiciera que, a las pocas horas de posicionar los sensores, algunos se movieran de la ubicación deseada provocando que las mediciones se detuvieran hasta que se volvieran a posicionar los sensores e iniciar las mediciones. Estas condiciones trajeron como consecuencia que una sección de una de las paredes de la quebrada se debilitará y se cayera encima del arreglo de sensores FBG11 y FBG12 (esto sucedió en horas de la madrugada del domingo 30 de junio de 2019). La fuerza del impacto fue tal que dañó de inmediato uno de los arreglos de sensores. Lo anterior implicó remover el material que había caído encima de los sensores, y cambiar el arreglo de sensores por el arreglo 4, una vez se revisó que las paredes adyacentes no presentaran un nuevo riesgo de derrumbamiento.

Una dificultad adicional que trajeron las condiciones meteorológicas en la implementación fue debida a la continua lluvia que acompañó la mayor parte

del tiempo de los días sábado y domingo 29 y 30 de junio de 2019, ya que este factor hizo que el sistema de suministro eléctrico planteado no fuese eficiente, puesto que no llegaba la suficiente luz ambiente a los paneles solares para cargar las baterías recargables. De esta manera, fue necesario replantear la necesidad de utilizar una fuente de energía independiente de las condiciones meteorológicas, y se decidió alquilar una planta de energía de gasolina, lo que implicó desplazarse hasta la ciudad más cercana para poder adquirir la planta de energía de gasolina mencionada al principio de la sección. Una vez instalada la planta, se verificó el posicionamiento del prototipo, se decidió desinstalar el arreglo de sensores FBG3 porque las condiciones del terreno adyacentes estaban inestables y el subsuelo estaba muy blando, lo que le representaba al arreglo de sensores la imposibilidad de reposar en el punto de interés.

Finalmente, las mediciones iniciaron el domingo 30 de junio siendo las 9:25 pm y finalizaron el lunes 1 de Julio a las 3:25 pm, utilizando 2 arreglos de sensores FBG, lo cual permitió tomar medidas por 18 horas. Las temperaturas registradas por cada arreglo de sensores FBG4 y FBG3 se presentan en las ilustraciones 47 y 48 respectivamente. En color Azul se presentan las temperaturas medidas en el agua superficial, mientras que en color marrón se presentan las temperaturas medidas en el agua subterránea.

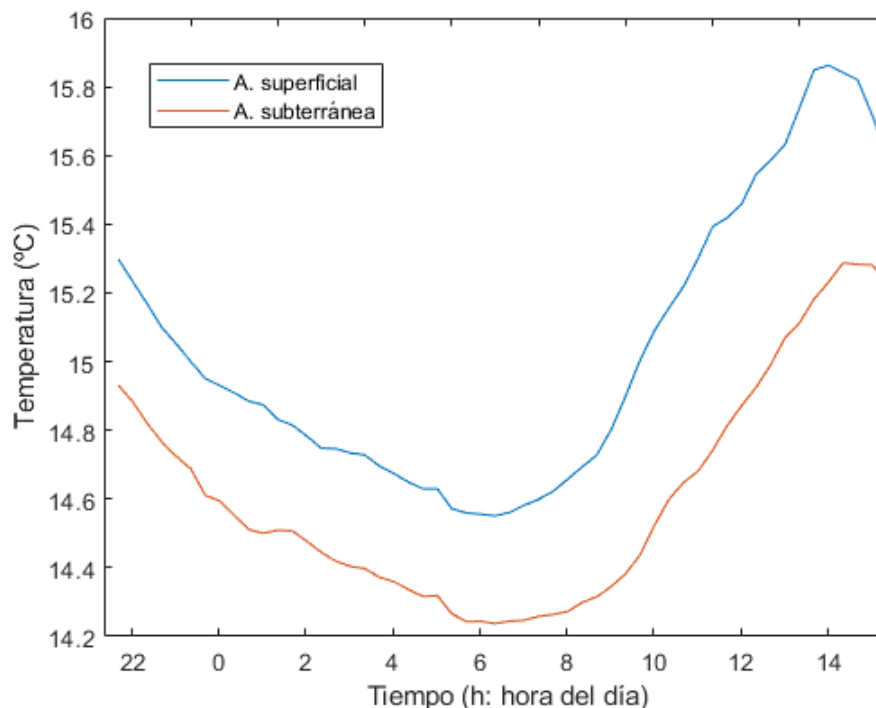


Ilustración 47. Registro de temperatura del arreglo de sensores FBG4 en la posición A.

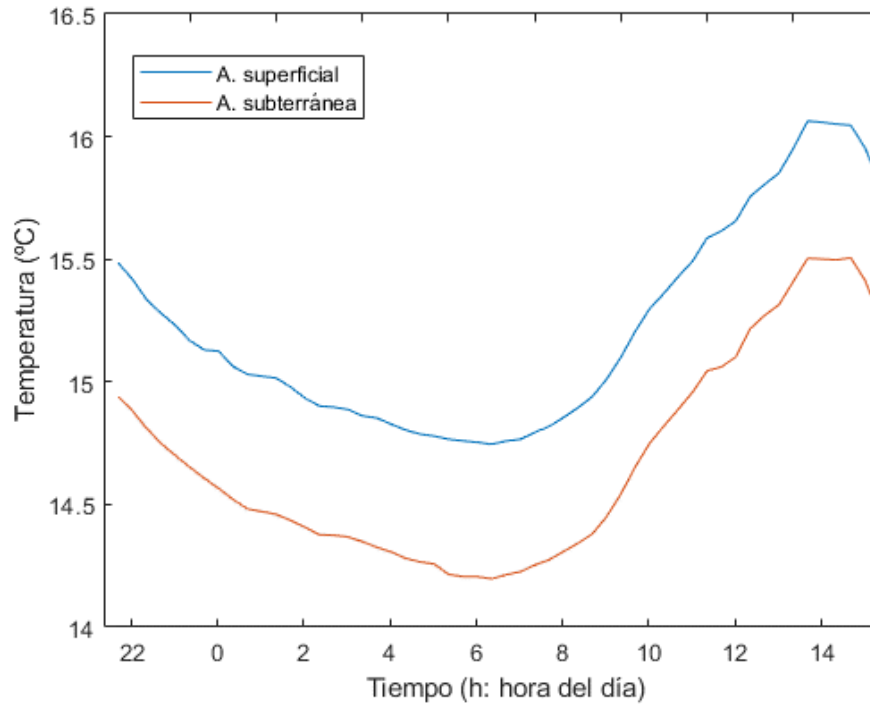


Ilustración 48. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG3 en la posición B.

Al observar las curvas presentadas en las ilustraciones 47 y 48, pareciese que tanto los sensores ubicados en el área subterránea como en el agua superficial presentan la misma tendencia de variación a medida que va variando el clima. Para poder analizar mejor el comportamiento de estas mediciones se obtuvieron los gradientes espaciales y temporales para cada punto de interés.

Para poder obtener los gradientes anteriormente mencionado, es importante tener en cuenta cómo se calculan estos. El gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea se calcula así:

$$\Delta T_{SW-GW}(t) = T_{SW}(t) - T_{GW}(t) \quad (4.3.1)$$

Donde  $T_{SW}(t)$  es la temperatura medida en el agua superficial en función del tiempo,  $T_{GW}(t)$  es la temperatura medida en el agua subterránea en función del tiempo, y  $\Delta T_{SW-GW}(t)$  es el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea. Y para el gradiente temporal se presenta la siguiente ecuación:

$$\Delta T_t(t) = T(t) - T(t-1), \text{ para } t \geq 1 \quad (4.3.2)$$

Donde  $T(t)$  representa la temperatura de interés en función del tiempo,  $T(t-1)$  representa la temperatura de interés anterior en el tiempo, y  $\Delta T_t(t)$  representa el gradiente temporal de temperatura.

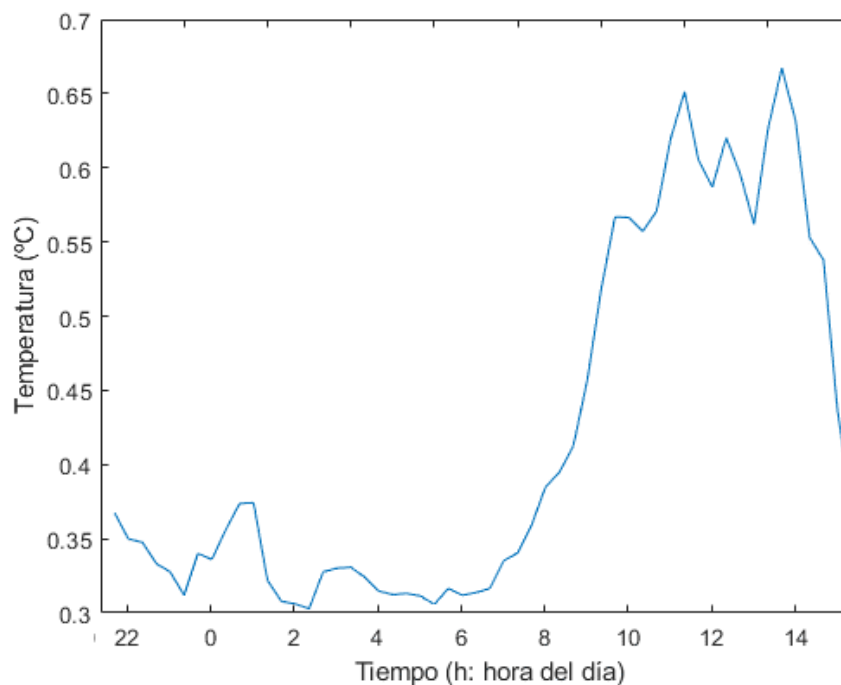


Ilustración 49. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición A.

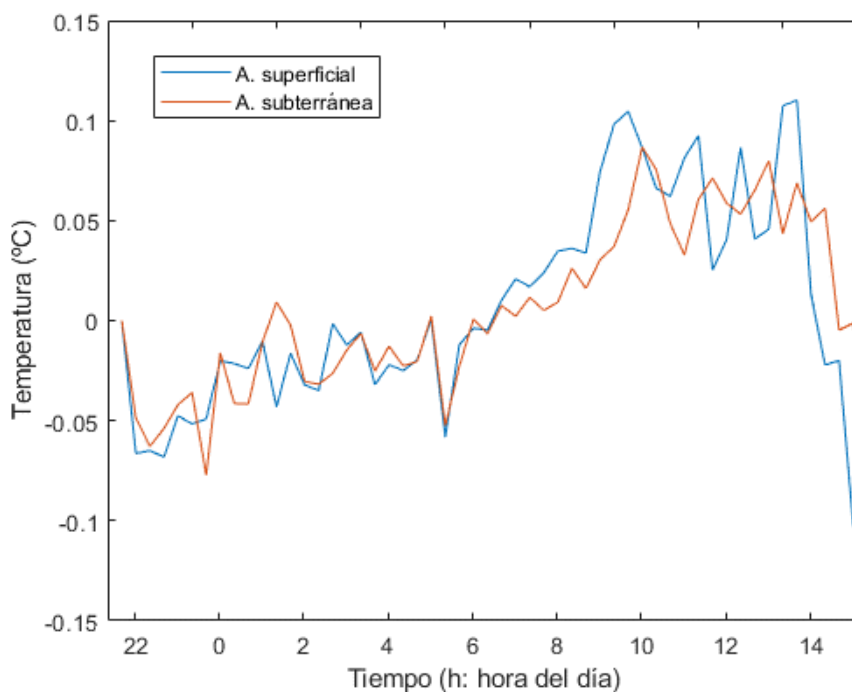


Ilustración 50. Gradiente temporal de temperatura en la posición A.

En las ilustraciones 49 y 50 se presentan los gradientes obtenidos para las mediciones registradas en la posición A. Al analizar el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea se observa claramente que

el agua superficial se ve afectada por la temperatura del ambiente en mayor medida que el agua subterránea, siendo su mayor diferencia en las mediciones del medio día, lo cual es un comportamiento esperado, puesto que es sabido que la temperatura en el agua superficial es más proclive a variar ante los cambios de temperatura en el ambiente, mientras que la temperatura del agua subterránea se ve afectada en menor medida por este efecto.

Al analizar el gradiente temporal para este mismo punto, se observa que, aunque la temperatura del agua subterránea varía con un leve retraso al cambio de temperatura que presenta el agua superficial, la curva presentada trata de mantener cierta semejanza en sus formas, y ambas presentan niveles cercanos en el gradiente de temperatura.

Lo anterior implica que el sensor ubicado en el agua subterránea, aunque estuvo bien posicionado en el agua subterránea, se ubicó muy poco profundo con relación al lecho de la quebrada, y por ende las mediciones presentan un alto grado de susceptibilidad ante los cambios experimentados por el agua superficial. Sin embargo, las mediciones realizadas por este arreglo de sensores confirman que el arreglo funciona correctamente para la finalidad diseñada.

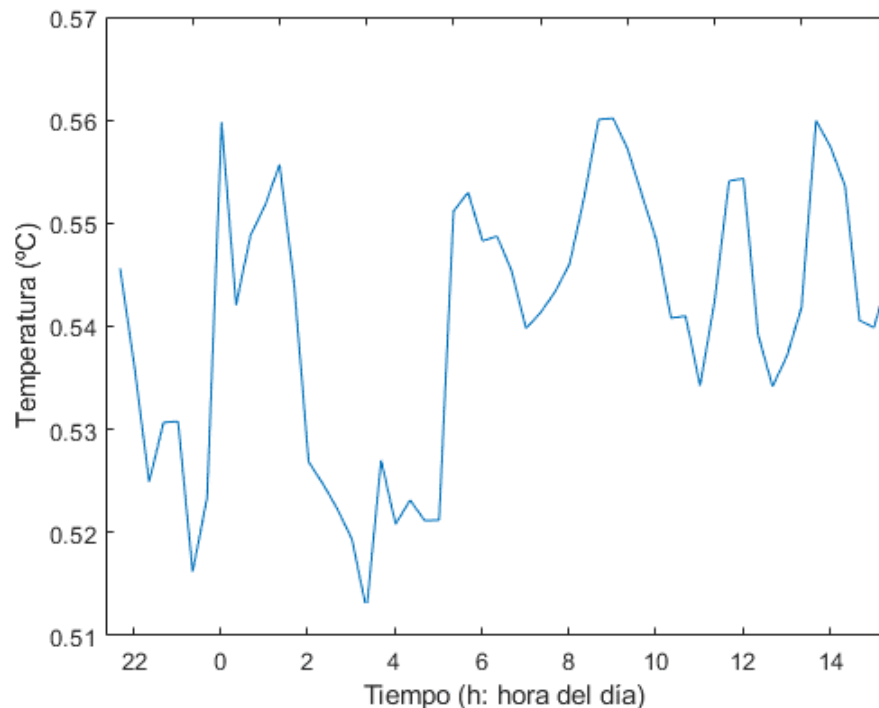


Ilustración 51. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición B.

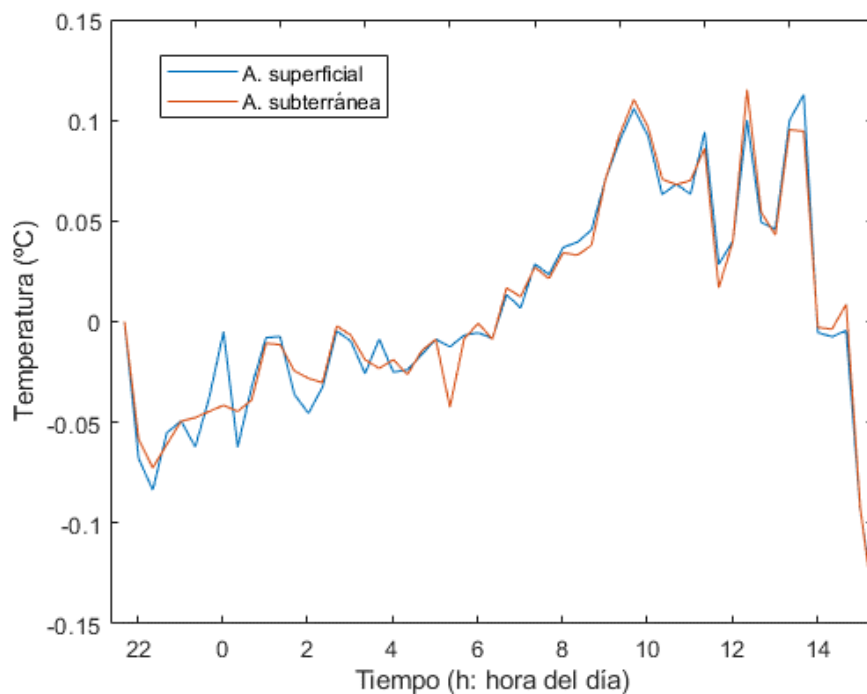


Ilustración 52. Gradiente temporal de temperatura en la posición B.

En las ilustraciones 51 y 52 se presentan los gradientes obtenidos para las mediciones registradas en la posición B. Al analizar el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea se observa que la variación en las 24 horas de medición entre las 2 temperaturas registradas está en el orden de  $0.5^{\circ}\text{C}$ , estando estas variaciones entre  $0.51^{\circ}\text{C}$  y  $0.56^{\circ}\text{C}$ . El anterior comportamiento tiene como explicación, que el sensor ubicado en el agua subterránea no se instaló correctamente, dejando que el agua superficial interactuara directamente con el sensor, de esta forma el sensor variaba prácticamente de la misma forma que el sensor ubicado del piso, y la variación de  $0.5^{\circ}\text{C}$  puede estar asociada al contacto de una parte del sensor con el subsuelo.

Adicionalmente, al analizar el gradiente temporal, se evidencia que la variación temporal de cada uno de los sensores tiene prácticamente el mismo comportamiento, lo que reafirma que ambos sensores estaban en contacto directo con el agua superficial. Por lo cual la medición con este arreglo de sensores para la posición B no es satisfactoria.

Al concluir la primera implementación, se decidió que los datos obtenidos no presentaban las condiciones para ser una prueba concluyente, ya que el sistema de posicionamiento no fue eficiente, y terminaron desubicados los sensores. Además, gran cantidad de residuos orgánicos se posaron en la fibra óptica que atravesaba el cuerpo de agua para salir a la ladera, e incluso hasta animales como lombrices se entorcharon en la fibra, haciendo que las mediciones se realizaran con pérdidas de potencia óptica producidas por estos animales al doblar y estresar la fibra. Sin embargo, esta implementación



evidenció nuevas consideraciones para tener en cuenta, por lo cual, se decidió que se debía replantear la estructura para soportar los sensores FBG, así como también una estructura para proteger la fibra óptica que atraviesa el cuerpo de agua y por ende cambiar la forma de instalación para poder obtener mediciones fiables ofreciendo una mayor protección al sistema prototipo de medición.

### **Segunda implementación del prototipo de medición de temperatura**

Para la segunda implementación, lo primero que se ajustó fue el diseño de una estructura sólida para el posicionamiento de los sensores. Con el fin de mitigar los efectos producidos por residuos orgánicos, así como la adherencia de animales alrededor de la fibra y los sensores, se decidió que la base de la estructura fuera un rin No 16 de plástico para bicicleta pequeña. Lo anterior se fundamenta en que el rin al ser circular permite que se posicione el sensor y se enrolle la fibra alrededor de él, además, presenta como ventaja que en el contorno circular presenta una cavidad cóncava, lo que elimina la problemática del posicionamiento y estrangulamiento de la fibra por parte de animales o residuos orgánicos, puesto que de entorcharse a algún animal como una lombriz lo haría alrededor del rin, y no tendría posibilidad de hacerlo directamente a la fibra óptica. De esta manera se instala el sensor que se ubicará en el agua superficial en el rin y la fibra que comunica con el otro sensor usando cinta para ductos y cinta de enmascarar.

Además, para los sensores que se posicionan en el subsuelo, se diseñó una base en alambre calibre 12 en forma de U que sale del rin, lo anterior le da una estructura rígida para adherir la fibra y el sensor que se posicionará en el subsuelo. Lo anterior tiene como finalidad darle protección a la fibra óptica y al sensor y, además, esta estructura nos permitirá determinar la profundidad a la que se instala el sensor con respecto al lecho del cuerpo de agua. Una vez instalado el sensor, se le instala a la estructura una protección adicional, la cual consiste en una manguera alrededor del alambre desde que comienza la U hasta donde está el sensor FBG, el cual posee protección metálica, y después del sensor hasta llegar nuevamente al rin, de esta forma cuando se entierre el sensor, la fibra que lo comunica estará aislada de peligro como rocas filosas y demás materiales que pudiera dañarle en el subsuelo.

Para finalizar la estructura de los sensores, se decidió que la fibra que sale del rin para poder conectarse con otros arreglos de sensores FBG, se haría por medio de tubería Conduit. Lo anterior se decidió debido a que la tubería Conduit permite que se pueda enrollar facilitando el traslado al lugar de medición. Además, la tubería le ofrece a la fibra óptica protección contra los residuos que traiga el agua en el tiempo que permaneciese la implementación permitiendo que la fibra óptica salga de la estructura de los sensores hasta arriba de la ladera de la quebrada para su interconexión con otros arreglos de sensores FBG. De este modo, la estructura terminada mitiga el riesgo de avería debida a derrumbes de la ladera, evita que tanto residuos orgánicos



como animales se posen en la fibra óptica reduciendo de este modo pérdidas inducidas por estrés o doblamiento en la fibra óptica. También se evita el riesgo de daño de la fibra óptica que se entierre en el subsuelo debida a rocas filosas del subsuelo. Por último, mitiga la incertidumbre del posicionamiento del sensor que se posiciona en el subsuelo. La Ilustración 53, muestra partes de cómo se instaló el arreglo de sensores en la estructura diseñada para la instalación del prototipo.



Ilustración 53. Estructura diseñada para la instalación del arreglo de sensores FBG.

Una vez finalizadas las estructuras para la instalación de los sensores, se volvieron a pedir los permisos requeridos para los días 12, 13 y 14 de octubre del año 2019. También, se procedió a desplegar la logista para la instalación del sistema de medición prototipo para la segunda implementación en campo.

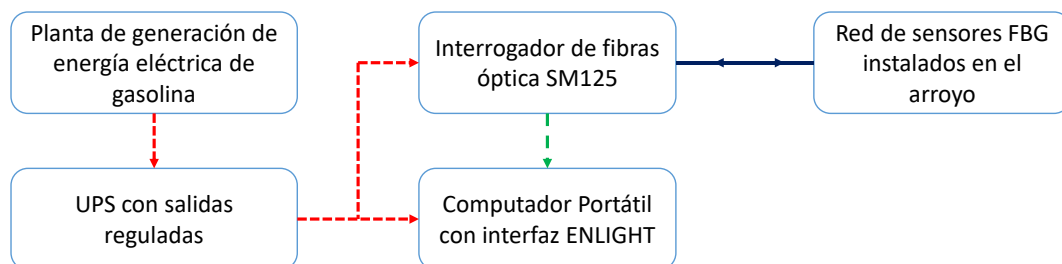


Ilustración 54. Esquema de conexión para el sistema de medición en campo.

La Ilustración 54 presenta el esquema de conexión para el sistema de medición de temperatura en campo, donde se observa que el suministro de energía es realizado por una planta de generación de energía eléctrica de gasolina, a la cual se le conecta a la salida una UPS con salidas reguladas para protección y prevención de fallas del suministro de energía a los equipos de medición. El interrogador de fibras ópticas es conectado por protocolo Ethernet al computador, mientras que la salida óptica se conecta a la red de sensores FBG, por último, el computador recibe y almacena los datos registrados por el interrogador por medio de su interfaz ENLIGHT.



Ilustración 55. Campamento de los equipos de medición.

El sábado 12 de octubre de 2019, se instaló el prototipo de medición de temperatura en campo. En la carpa que se muestra en la Ilustración 55, se encontraban el interrogador de fibras óptico, el computador portátil y la UPS, la cual se conectaba por una extensión eléctrica a la planta de generación de energía eléctrica de gasolina que se ubicaba a un par de metros del campamento. Los equipos de medición quedaron cerca de la ladera del primer punto de interés (ver Ilustración 26). Si se mira cuidadosamente la Ilustración 55, se alcanza a observar que en la quebrada está instalado el arreglo de sensores FBG4.

Para fijar los sensores, además de usar la estructura misma diseñada, se clavaron estacas profundas dentro del borde interno del rin para asegurar su posicionamiento. Para el arreglo de sensores FBG4, se midió que el sensor para el agua superficial quedara instalado a 23 cm de profundidad del agua, mientras que el sensor que se instaló en el subsuelo quedó instalado a 15 cm del lecho del cuerpo de agua. La Ilustración 56, muestra la estructura del sensor FBG4 instalado en la posición 1 de medición.





Ilustración 56. Arreglo de sensores FBG4 instalado en la posición 1.

De manera análoga a la primera estructura instalada, el arreglo de sensores FBG2 se instaló en la segunda posición. Cabe recordar, que esta ubicación viene precedida de un par de escalones de agua que están en una doble curva (ver Ilustración 27), y además el escalón seleccionado era más profundo hacia el escalón que lo antecedía y poco profundo hacia donde terminaba el escalón, lo que implicó que la parte trasera de la estructura queda afuera del agua, lo cual no tiene implicación en las mediciones debido a que los sensores se ubicaron en la parte posterior de la estructura. Para el arreglo de sensores FBG2, se midió que el sensor para el agua superficial quedara instalado a 11 cm de profundidad del agua, mientras que el sensor que se instaló en el subsuelo quedó instalado a 10 cm del lecho del cuerpo de agua. La Ilustración 57, muestra la estructura del sensor FBG2 instalado en la posición 2 de medición.



Ilustración 57. Arreglo de sensores FBG2 instalado en la posición 2.

A la tercera posición de interés se le instaló el arreglo FBG3 justo antes de la caída de agua del escalón (ver Ilustración 28 para ver la ubicación). Esta ubicación se caracterizaba por ser muy rocosa, por lo que fue necesario buscar un punto próximo al escalón donde el subsuelo no presentara formaciones rocosas. Luego de posicionada la estructura se midieron las profundidades de los sensores del arreglo FBG3. El sensor para el agua superficial quedó instalado a 14 cm de profundidad del agua, mientras que el sensor que se instaló en el subsuelo quedó instalado a 8 cm del lecho del cuerpo de agua. la Ilustración 58, muestra la estructura del sensor FBG3 instalado en la posición 3 de medición.



Ilustración 58. Arreglo de sensores FBG3 instalado en la posición 3.

Una vez finalizada la instalación del prototipo de medición, se procedió a la verificación de la conexión y medición por medio del software ENLIGHT. Como se observa en la Ilustración 59, los 6 sensores están bien conectados e instalados, lo cual permitió comenzar con el proceso de toma de datos por 24 horas siendo las 8:35 pm del sábado 12 de octubre.

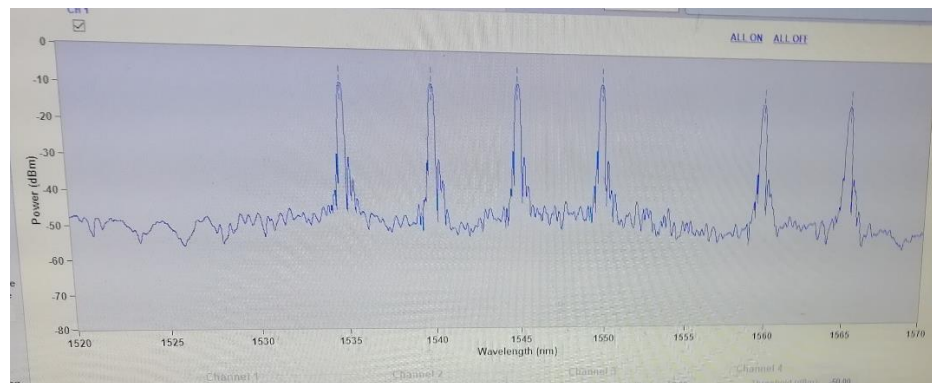


Ilustración 59. Medición de los sensores FBG en campo.

Las mediciones registradas por el sistema prototipo de medición de temperatura finalizaron el domingo 13 de octubre a las 8:35 pm sin ningún incidente, demostrando que las estructuras instaladas para los sensores FBG lograron minimizar los inconvenientes presentados en la primera implementación. En esta medición, se obtuvieron 86400 datos por cada sensor FBG, los cuales fueron procesados en grupos de 600 datos debido a que la temperatura no es una variable que cambie instantáneamente y de esta forma facilitar el procesamiento de estos. A continuación, se mostrarán y analizarán las mediciones registradas por punto de interés.

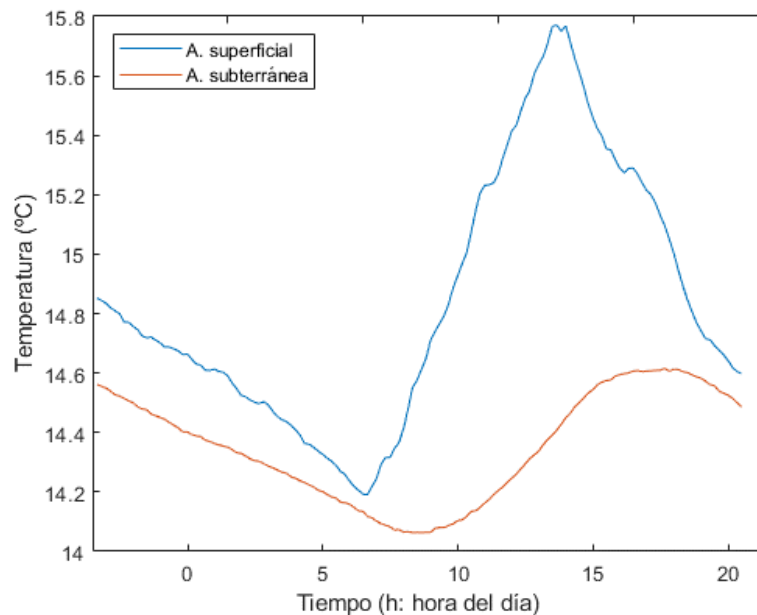


Ilustración 60. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG4 en la posición 1.

Para el punto de interés de la posición 1, se obtuvieron las mediciones de temperatura mostradas en la Ilustración 60. En azul se presenta la temperatura medida en el agua superficial, mientras que en marrón se presenta la temperatura medida en el agua subterránea. Esta medición muestra claramente los comportamientos de cada una de las zonas estudiadas, donde se observa una diferencia en la variación de temperaturas en estos dos flujos de agua tanto en magnitud como en la forma de respuesta.

La variación de temperatura en el subsuelo muestra visiblemente que las variaciones sufridas son mucho menores que las obtenidas en el agua superficial, así como su remanencia a subir de temperatura a la misma tasa que lo realiza el agua superficial. Adicionalmente, se observa que la variación máxima de temperatura en la zona hiporreica en las 24 horas de mediciones es alrededor de 0.5°C. Lo anterior se ratifica en el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea presentada en la Ilustración 61, donde se observa que hay un gradiente máximo de hasta casi 1.4 °C, lo cual es considerable teniendo en cuenta que el lugar de medición está ubicado en



tierra fría y por ende la temperatura ambiente en el día no supera los 20°C, de este modo las variaciones que induce al agua superficial a la entrada de la zona hiporreica no van a ser elevadas.

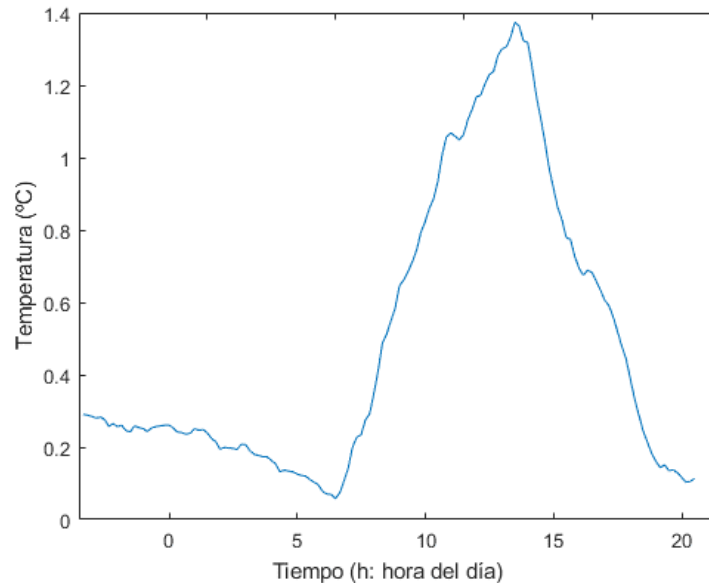


Ilustración 61. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 1.

Al analizar el gradiente temporal para los dos sensores del mismo arreglo presentados en la Ilustración 62, se observa que los cambios en la temperatura del agua subterránea se realizan a una baja tasa de variación, siendo el mayor cambio de 0.05°C, lo cual representa que las variaciones registradas tengan como efecto que la temperatura sea más estable a lo largo del tiempo. Al comparar las variaciones del gradiente de temporal de temperatura del agua subterránea sufridas por la interacción con el agua superficial presentan una curva suave en la variación de la temperatura en contraste con el agua superficial.

Sin embargo, es de esperar que las variaciones de temperatura evidenciadas en el gradiente temporal en el agua superficial no superen unas pocas décimas de grados Celsius debido a que esta medida representa una comparación de cómo la temperatura en este punto va variando con respecto a determinado paso de tiempo, que para este caso se realizó para las mediciones registradas en intervalos de 20 minutos. De este modo, aunque haya un cambio de temperatura en el agua subterránea debida a la interacción con el agua superficial, la condición de frontera debida a la zona hiporreica hace que el comportamiento en la temperatura del agua subterránea sea más estable corroborando lo reportado en [53].

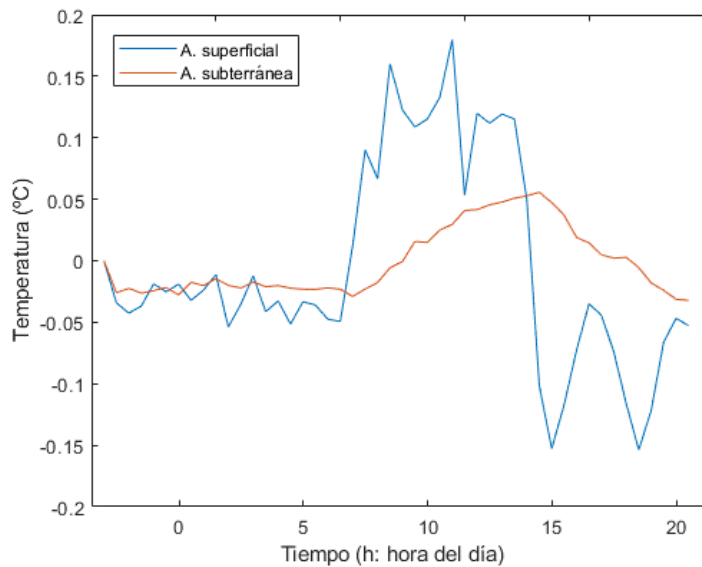


Ilustración 62. Gradiente temporal de temperatura en la posición 1.

Para el punto de interés ubicado en la posición 2, se presentan las curvas de temperatura obtenidas en la medición en la Ilustración 63. Esta medición muestra los comportamientos de cada una de las zonas estudiadas, donde se observan algunas diferencias en la variación de temperaturas en estos dos flujos de agua en magnitud con ciertas semejanzas en las formas de cada las curvas.

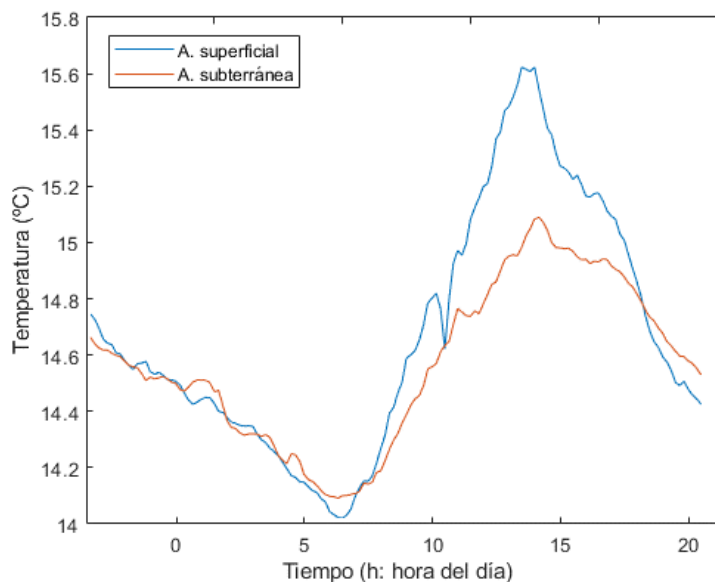


Ilustración 63. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG2 en la posición 2.

La variación de temperatura en el subsuelo muestra un comportamiento muy parecido a las experimentadas por el agua superficial, donde se observa que las respuestas tienen un leve retraso en la forma cómo están variando las



curvas y la mayor diferencia se observa en la magnitud de las señales que se registró en inmediaciones del medio día, siendo las temperaturas máximas alcanzadas de  $15,6^{\circ}\text{C}$  en el agua superficial y de alrededor de  $15.1^{\circ}\text{C}$  para el agua subterránea. Aunque las variaciones sufridas en la temperatura medida en el subsuelo son menores que las obtenidas en el agua superficial, esta temperatura trata de mantener cierto grado de remanencia a la variación de temperatura con relación a la forma en que lo realiza el agua superficial.

Adicionalmente, se observa que la variación máxima de temperatura en el subsuelo durante las 24 horas de mediciones es de alrededor de  $0.9^{\circ}\text{C}$ . Lo cual a priori parecería significativo considerando que la variación máxima en el agua superficial es  $1.6^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, hay que considerar que la posición 2 es justamente en la caída de agua de un escalón, de esta forma, el agua al venir con cierta rapidez sumado al hecho de caer por gravedad e impactar el subsuelo, hace más proclive que haya una interacción más dinámica entre los 2 flujos que se están analizando, y de esta forma no es de extrañar, que las curvas presenten estos grados de semejanza en sus respuestas.

Un evento adicional para tener en cuenta es el observado entre las 10 am y 11 am, cuando la curva de temperatura para el agua superficial presenta un cambio abrupto en la pendiente generando un decrecimiento en la temperatura por unos minutos, además al observar el mismo intervalo de tiempo en la temperatura registrada por el sensor que está enterrado en el subsuelo, este no presenta dicha variación. Una posible hipótesis para este evento es que justo en ese intervalo de tiempo algún tipo de residuo (orgánico o no orgánico) se posó por unos momentos al frente del sensor, lo cual provocó esta variación, y cuando este residuo se alejó del sensor, la curva volvió a presentar el cambio de pendiente positiva que venía trayendo antes del evento.

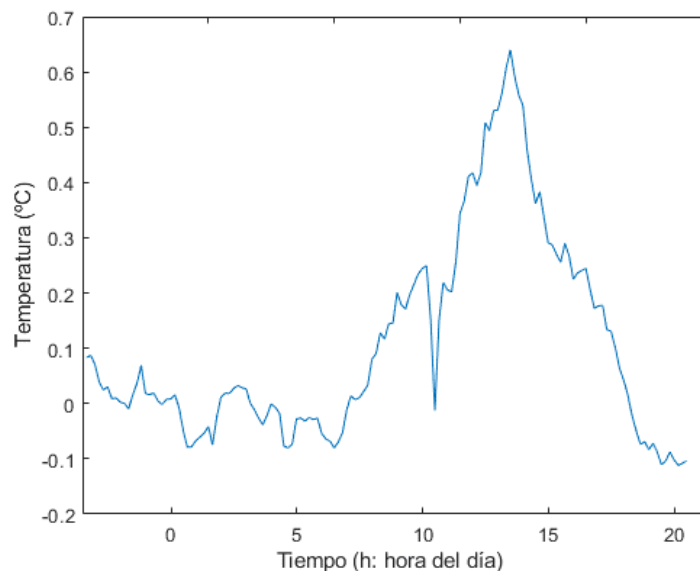


Ilustración 64. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 2.

Por otra parte, al analizar el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea presentada en la Ilustración 64, se observa que el mayor gradiente es poco superior a  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teniendo en cuenta las acotaciones realizadas para este punto de interés, se obtiene un gradiente aceptable, dada la posición general del arreglo de sensores. En especial el sensor ubicado en el subsuelo que estaba enterrado solamente a 11 cm del lecho de la cuenca y esto sumado a las condiciones climatológicas de la zona. Sin embargo, las variaciones de temperatura inducidas por el agua superficial a la entrada de la zona hiporreica fueron significativas lo que implica una mayor conexión entre los 2 flujos. Por último, en esta gráfica se acentúa más el evento del intervalo entre las 10 am y 11 am explicado anteriormente. En este aspecto es de esperarse que el evento tuviera una consecuencia para los gradientes hallados, sin embargo, no representa un mayor aporte en el entendimiento de estos.

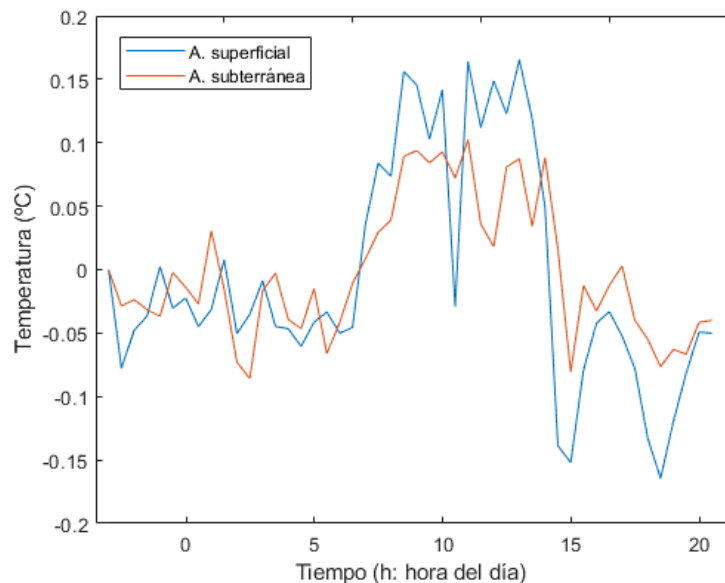


Ilustración 65. Gradiente temporal de temperatura en la posición 2.

En la Ilustración 65 se presenta el gradiente temporal para los dos sensores del arreglo FBG2. Aquí se observa que los cambios presentados en la temperatura del agua subterránea se realizan a una tasa de variación más baja que la del gradiente correspondiente al agua superficial. Siendo el mayor cambio cercano a  $0.1^{\circ}\text{C}$ , mientras que por otra parte el máximo valor del gradiente temporal de temperatura para el agua superficial fue alrededor de  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De este modo, las variaciones registradas en el subsuelo muestran en su forma un moderado grado de dependencia con al agua superficial sin dejar de ser más estable en temperatura a lo largo del tiempo que el gradiente temporal para el agua superficial. Al realizar una comparación directa de las variaciones del gradiente temporal de temperatura del agua subterránea sufridas por la interacción con el agua superficial, se observa que para las

variaciones de temperatura menores a  $0^{\circ}\text{C}$  se presenta una curva suave que intenta estabilizarse en el tiempo.

También se evidencia en el gradiente temporal del agua superficial, el evento estudiado entre las 10 am y 11 am, donde se tuvo un gradiente de temperatura apenas inferior de  $0^{\circ}\text{C}$ , lo que implicó que la temperatura no pudiera incrementarse durante el tiempo que duró el evento. Para realizar el cálculo de este gradiente, se tuvieron en cuenta las mediciones registradas por intervalos de 20 minutos.

Por último, en la Ilustración 66 se presenta las curvas de temperatura obtenidas en la medición del punto de interés ubicado en la posición 3. Esta medición muestra los comportamientos obtenidos en la posición donde se observan ciertas diferencias en la variación de temperatura entre el agua superficial y subterránea en magnitud con algunas semejanzas en las respuestas de ambas curvas.

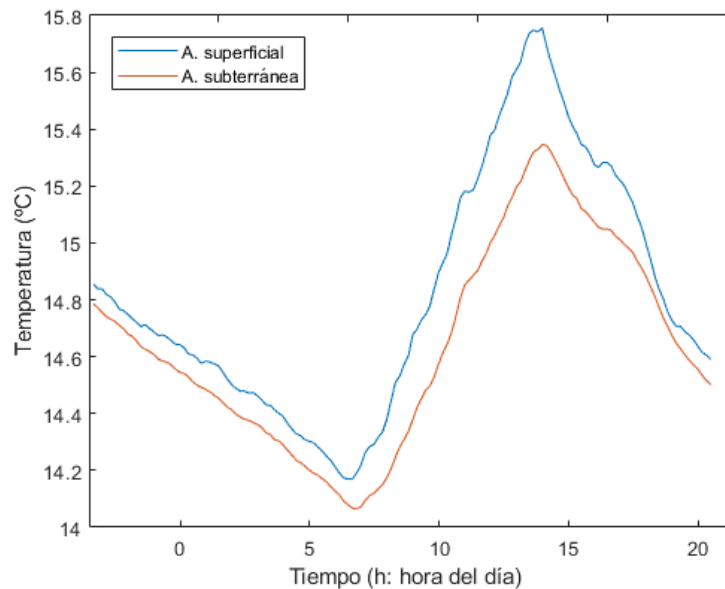


Ilustración 66. Medición de temperatura del arreglo de sensores FBG3 en la posición 3.

Al revisar la Ilustración 66, se observa que las variaciones de temperatura experimentadas por el agua superficial y subterránea tienen un comportamiento parecido en la forma de sus curvas en la mayor parte de la medición. En estas curvas se alcanza a discernir que la respuesta de temperatura del agua subterránea tiene un pequeño retraso en la forma con relación a las variaciones experimentadas en el agua superficial. Al observar las variaciones en magnitud de estas temperaturas, se aprecia que después del medio día, alrededor de las 2 pm, se encuentran los máximos de temperatura alcanzados por cada curva y es donde la diferencia en temperatura entre éstas alcanza su máximo valor. Siendo estas temperaturas de  $15.75^{\circ}\text{C}$  para el agua superficial y  $15.3^{\circ}\text{C}$  para el agua subterránea.

Adicionalmente, se puede observar que la variación máxima de temperatura en el subsuelo durante las 24 horas de mediciones fue cercana a  $1.2^{\circ}\text{C}$ , mayor a la experimentada por los otros dos sensores instalados en el subsuelo del lecho del cuerpo de agua. Esta variación es considerable al compararla con la variación máxima de temperatura en el agua superficial, la cual fue de  $1.55^{\circ}\text{C}$ . Lo anterior implica, que la interacción entre estos dos flujos de agua es alta. Esto puede ser debido a la composición del subsuelo de esta zona, ya que como se explicó en la instalación de los sensores, el subsuelo presentaba varias agrupaciones rocosas, lo cual puede favorecer a la filtración del agua superficial. De esta manera la interacción entre estos dos flujos es más activa, sin que eso represente que estén directamente conectadas. Además, el sensor que se posicionó en el subsuelo fue el más superficial de los tres. Teniendo en cuenta las demás consideraciones, se entiende por qué las curvas presentan estos grados de semejanza en sus respuestas sin que estas sean iguales.

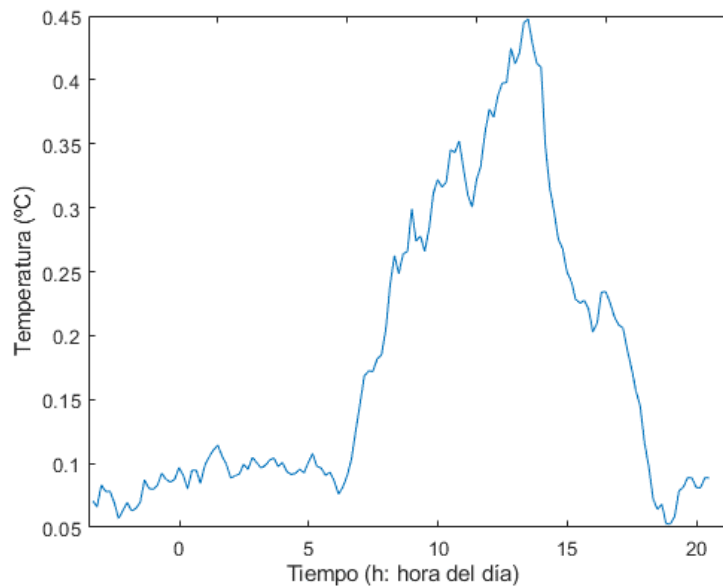


Ilustración 67. Gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea en la posición 3.

La Ilustración 67 presenta el gradiente de temperatura entre el agua superficial y subterránea donde se observa que el mayor gradiente está en  $0.45^{\circ}\text{C}$ , y donde claramente se observa el efecto de la luz del día en el gradiente calculado. El gradiente también confirma que las variaciones presentadas no son grandes pero admisibles debido a la conectividad que presenta la zona hiporreica en ese punto al ser una zona sedimentada con una alta composición rocosa. También, del gradiente se puede inferir, que el posicionamiento de los sensores se ejecutó correctamente puesto que es claro que, aunque las curvas de temperatura presentan semejanzas en sus formas de respuesta, la tasa de cambio no es la misma y por ende el gradiente obtenido no da una temperatura con tendencia de cambio constante confirmando de esta manera que las mediciones se hicieron en las ubicaciones deseadas.

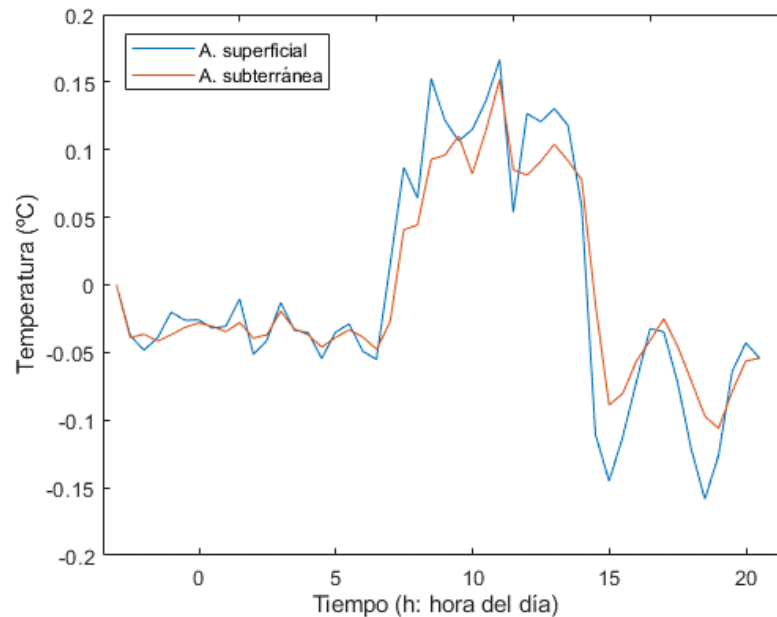


Ilustración 68. Gradiente temporal de temperatura en la posición 3.

Para finalizar el análisis por puntos de interés, la Ilustración 68 muestra el gradiente temporal para los dos sensores del arreglo FBG3. En esta ilustración, los cambios observados en la temperatura del agua subterránea tienen una forma muy similar a los obtenidos para el agua superficial con una diferencia pequeña entre las magnitudes de ambos gradientes. El máximo gradiente temporal obtenido para el agua superficial es cercano a  $1.15^{\circ}\text{C}$  mientras que el gradiente temporal del sensor ubicado en el subsuelo presentó un gradiente máximo de  $1.14^{\circ}\text{C}$ .

Adicionalmente, las variaciones registradas en el agua superficial muestran en la forma de su respuesta una variación que tiene un retardo de unos minutos al compararse con la curva hallada para el agua superficial, y una dependencia considerable entre las dos curvas debidas a alto grado de conectividad entre estos dos flujos de agua. Sin embargo, al revisar las variaciones de temperaturas por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$  se evidencia que el gradiente temporal del agua subterránea se representa con variaciones mucho menores que las presentadas por el agua superficial, siendo coherente con el comportamiento teórico esperado. El cálculo de estos gradientes temporales al igual que los calculados para los gradientes temporales de las 2 primeras posiciones utilizaron las mediciones registradas por intervalos de 20 minutos.

Finalmente, en la Ilustración 69 se presentan el gradiente espacio - temporal de temperatura de la interacción entre el agua superficial y el subsuelo obtenido en la implementación del sistema prototipo de medición de temperatura mediante el uso de sensores de temperatura quasidistribuidos.

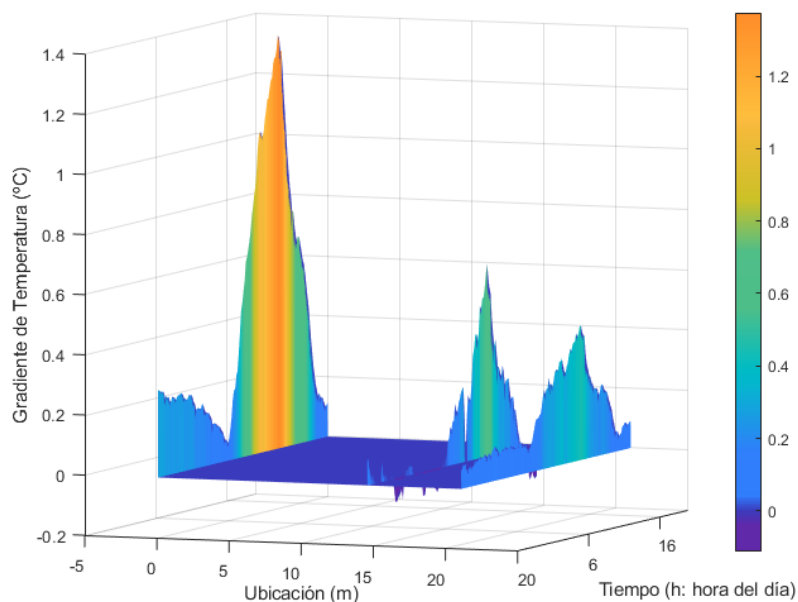


Ilustración 69. Gradiente espacio - temporal de temperatura entre el agua superficial y el agua subterránea del área de interés.

En la anterior ilustración, al comparar las tres distintas curvas es fácil asociar semejanzas en la magnitud de los gradientes obtenidos en las posiciones 2 y 3. Estos presentan una pequeña diferencia en sus magnitudes, y aunque fueron analizados individualmente en las ilustraciones 64 y 67, estas diferencias también pueden ser asociadas al tipo de ubicación de estos sensores. Recordando que las estructuras de los sensores FBG2 y FBG3 fueron posicionadas en formaciones tipo escalón, con la diferencia que la posición 2 constaba de una serie de escalones que tanto los antecedían como seguían después de él, mientras que la posición 3, solo presentaba un escalón que seguía inmediatamente a la ubicación de la estructura de los sensores. De esta manera, las respuestas obtenidas en magnitud para las dos posiciones muestran el comportamiento debido a formaciones tipo escalón. Por otra parte, el gradiente obtenido en la posición 1 es significativamente más grande a las otras dos mediciones, lo cual también está correlacionado con su ubicación. La estructura de los sensores FBG4 se ubicó en medio de una curva, por lo cual las interacciones llevadas a cabo en esta posición son diferencialmente distintas porque la dirección del flujo del agua superficial sigue la estructura del arroyo, mientras que la dirección del flujo de agua subterránea recorta la curva. Esto implica que la forma en que interactúan estas dos zonas es distinta a la presentada en las formaciones tipo escalón.

De los resultados anteriormente expuestos, el sistema del prototipo de medición demostró ser estable, preciso e idóneo para las mediciones de este tipo, al obtener mediciones que se correlacionan con los comportamientos esperados teóricamente en las zonas estudiadas. De esta manera, la prueba de concepto fue satisfactoria y el sistema está en condiciones de ser implementado en trabajos futuros que impliquen estudios o aplicaciones en la

medición de variaciones de temperatura en la interacción del agua superficial con el subsuelo.



## Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo presenta la implementación de un prototipo de medición de variaciones espacio - temporales de temperatura del agua en su interacción superficie y el subsuelo utilizando redes de difracción de Bragg en un tramo de un arroyo de montaña colombiano. Este trabajo fue planteado y desarrollado en el grupo de investigación de altas Frecuencias y telecomunicaciones (CMUN), con la colaboración del grupo de investigación HYDS hydrodynamics of the natural media. El trabajo permitió un acercamiento a la implementación de un sistema de medición de temperatura basado en sensores cuasi-distribuidos como forma alternativa para la realización de investigación en hidrología.

En primera instancia se realizó una revisión bibliográfica y de estado del arte que permitió determinar los componentes del sistema como el tipo y encapsulado de los sensores FBG requeridos para este trabajo. De esta manera se determinó que los sensores FBG con referencia T830 fabricados por la empresa Technica Optical Components eran los que se ajustaban a las características del proyecto y a las necesidades en investigación del contexto colombiano.

A continuación, se procedió a realizar las pruebas de caracterización y validación del comportamiento y la respuesta de los sensores diseñados y adquiridos para este trabajo con la finalidad de comprobar la sensibilidad de estos. Se realizó una caracterización en temperatura para cada uno de los 4 arreglos de pares de sensores FBG utilizando un horno de temperatura marca Memmert modelo 30 por un tiempo de 15 horas.

Los resultados obtenidos en la caracterización de temperatura corroboraron la linealidad de la respuesta de los sensores, y permitieron adquirir las ecuaciones para cada una de las curvas de caracterización de los sensores. Se encontró que las respuestas de sensores a cambios de temperatura varían entre 9.4 pm a 9.7 pm por cada 1°C. Los anteriores resultados muestran que las pendientes de las curvas de caracterización varían cerca a los 10 pm por 1°C, confirmando lo que dice la teoría. Adicionalmente, los coeficientes de determinación  $R^2$  hallados en cada linealización estuvieron todos por encima de 0.9998 demostrado la buena calidad de los modelos obtenidos y la capacidad de replicación de las mediciones.

Por otra parte, se realizó una prueba en los laboratorios de ensayos hidráulicos, donde los sensores fueron posicionados dentro de un canal de agua. Se tomaron mediciones a diferentes niveles con agua en movimiento, siendo 55 cm el nivel de la columna de agua más alta a la que fueron expuestos. En este proceso se tomaron 300 datos para cada una de las 5 mediciones de nivel realizadas. Esta prueba validó que los sensores FBG son inmunes a variaciones externas en temperatura, debido a que la máxima variación encontrada entre el menor y mayor nivel de la prueba no superaron los 2 pm en la respuesta espectral de los sensores. Se determinó que dicha variación fue inducida por la variación de temperatura a lo largo de la prueba, ya que cuando inició la prueba, la temperatura medida por un medidor DTS fue de 18.1°C mientras que cuando finalizó la medición del último nivel de agua, la temperatura era de 18.3°C, por lo cual la diferencia de casi 2 pm es debida a temperatura y no a otra variable.

Finalmente, se implementó el sistema prototipo de medición en un arroyo de montaña en la vereda de Puente de Boyacá del departamento de Boyacá, Colombia. Donde se instaló y se realizaron mediciones simultaneas y continuas por un periodo de 24 horas en 3 puntos de interés. Los arreglos de sensores se ubicaron de la siguiente manera: la distancia entre el primer arreglo de sensores y el segundo fue de 14.5 m mientras que la distancia entre el primer y tercer arreglo de sensores fue de 21 m.

Se determinó que un factor crítico para obtener resultados satisfactorios en la instalación es el diseño de estructuras para la instalación de los sensores. Los cuales les dan soporte a los sensores y al mismo tiempo protegen la fibra óptica que los conecta y se ve inmersa en el agua. Lo anterior mitiga los riesgos inherentes a una instalación en campo hostil, donde puede haber derrumbes, tránsito de animales, flujo de residuos orgánicos e inorgánicos.

Al finalizar las mediciones y procesar los datos se obtuvieron los gradientes, por punto de interés, temporales, y finalmente el gradiente espacio - temporal de temperatura. Las mediciones mostraron diferencias en la forma de la respuesta y magnitud debidas al tipo de zona de interés estudiada y a la profundidad de los sensores instalados en el subsuelo. En este se observó que el mayor gradiente fue obtenido por el arreglo de sensores que se ubicaba en una curva del arroyo, para la cual el gradiente de temperatura del agua en la interacción de la superficie y el subsuelo fue máximo de 1.4°C. Para la segunda posición se encontró que el mayor gradiente entre el agua superficial y subterráneo fue alrededor de 0.6°C, y para la tercera posición el mayor gradiente fue de 0.45°C. Los gradientes temporales de temperatura para los sensores ubicados en el subsuelo presentaron magnitudes menores a los gradientes temporales del agua superficial. También los primeros presentaron un retraso en la respuesta, comprobando que el agua subterránea varía de manera más lenta ante los cambios inducidos por el ambiente a través de la zona hiporreica. De esta manera, se concluye que el sistema prototipo de medición demostró su capacidad para realizar mediciones de temperatura y

variaciones de manera estable y precisa para aplicaciones en hidrografía, al obtener mediciones que se correlacionan con los comportamientos esperados teóricamente en las zonas estudiadas.

Una potencial aplicación del sistema de medición trabajado en este proyecto es para estudiar y determinar la afectación de aquellas obras civiles que interactúan con los cuerpos de agua. En este sentido, se pueden estudiar las interacciones que hay en puntos determinados donde se llevaría a cabo la instalación de una obra civil con el fin de determinar si la instalación a realizar presenta un riesgo para la conectividad hidrológica de la zona. De esta forma, se podría determinar la viabilidad ambiental de proyectos civiles en zonas de cuerpos de aguas protegidos como por ejemplo un humedal.

Una aplicación puntual en Colombia sería el estudio de las interacciones del agua superficial y subterránea en los humedales: Tibabuyes, Capellanía y La Conejera en la ciudad de Bogotá. La importancia de este estudio sería determinar la afectación hidrológica en el proyecto de la avenida longitudinal de occidente (ALO) en estos cuerpos de agua para los puntos donde se tenga planeado la instalación de columnas. En este estudio, el prototipo de medición tratado en el proyecto se podría adaptar a las condiciones propias de los puntos de interés. La instalación se tendría que hacer probablemente con equipamiento especializado y se tendría que cambiar la estructura de instalación de los sensores FBG, así como canalizar la fibra óptica de los mismos. Lo anterior, no tendría afectación alguna al desempeño del sistema, y de esta manera se podrían realizar mediciones simultáneas de temperatura en distintos puntos de interés y determinar los riesgos hidrológicos del proyecto y así decretar la viabilidad ambiental en el área hidrológica para el desarrollo de este proyecto civil tan importante para la ciudad de Bogotá.

Otra aplicación del sistema de medición sería la colaboración en el estudio del agua subterránea en suelos de inundación los cuales son explotados por los agricultores para sus sembrados en temporada seca. Se podrían caracterizar tanto en temporada húmeda como seca los procesos de recarga del agua subterránea, y de esta forma controlar que no se produzca una sobre explotación de los acuíferos. De este modo se podrían mitigar los riesgos en la afectación del subsuelo para los procesos de recarga y el funcionamiento correcto de estas zonas. Posibles lugares de interés serían cerca de cuerpos de agua de grandes como las zonas de inundación del río Magdalena a lo largo de su trayecto en Colombia.

## Referencias

- [1] F. Boano *et al.*, «Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications», *Reviews of Geophysics*, vol. 52, n.º 4, pp. 603-679, ago. 2014.
- [2] Y. Yao, H. Xiang, J. Liu, y C. Zheng, «Spatiotemporal variation of river temperature as a predictor of groundwater/surface-water interactions in an arid watershed in China», *Hydrogeology Journal*, vol. 23, n.º 5, pp. 999-1007, may 2015.
- [3] L. S. Amaya Toro, «Identificación de la zona hiporreica en un río sinuoso de montaña.», Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, colombia, 2016.
- [4] L. S. Amaya y L. D. Donado, «Determinación de la distribución del tiempo de residencia en la zona hiporreica de un río de alta montaña», presentado en Congreso Latinoamericano XII de Hidrogeología y XXVI de Hidráulica, Santiago, Chile, 2014, pp. 25-30.
- [5] R. C. Naranjo y R. Turcotte, «A new temperature profiling probe for investigating groundwater-surface water interaction», *Water Resources Research*, vol. 51, n.º 9, pp. 7790-7797, ago. 2015.
- [6] X. Lu, P. J. Thomas, y J. O. Hellevang, «A Review of Methods for Fibre-Optic Distributed Chemical Sensing», *Sensors*, vol. 19, n.º 13, p. 2876, jun. 2019.
- [7] D. Sparks, *Advances in Agronomy*, Primera., vol. 148. Estados Unidos de America: Academic Press, 2018.
- [8] K. Bhowmik *et al.*, «High Intrinsic Sensitivity Etched Polymer Fiber Bragg Grating Pair for Simultaneous Strain and Temperature Measurements», *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n.º 8, pp. 2453–2459, abr. 2016.
- [9] D. Chen, W. Liu, M. Jiang, y S. He, «High-Resolution Strain/Temperature Sensing System Based on a High-Finesse Fiber Cavity and Time-Domain Wavelength Demodulation», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, n.º 13, pp. 2477-2481, jul. 2009.
- [10] T. L. Lowder, K. H. Smith, B. L. Ipson, A. R. Hawkins, R. H. Selfridge, y Schultz, «High-Temperature Sensing Using Surface Relief Fiber Bragg Gratings», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, n.º 9, pp. 1926-1928, sep. 2005.
- [11] P. Quevauviller, *Groundwater Science and Policy: An International Overview*, Primera. Cambridge: RSC publishing, 2007.

- [12] R. J. Naiman, T. J. Kwak, y R. Bilby, *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Primera. New York: Springer, 1998.
- [13] W. k. Dodds y M. R. Whiles, *Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology*, Segunda. Estados unidos de America: Academic Press Inc, 2010.
- [14] L. F. DeBano y P. F. Folliott, *Riparian Areas of the Southwestern United States: Hydrology, Ecology, and Management*, Primera. Estados unidos de America: CRC Press, 2003.
- [15] R. González-Pinzón *et al.*, «A field comparison of techniques to quantify surface water-groundwater interactions», *Freshwater Science*, vol. 34, n.º 1, pp. 139-160, ene. 2015.
- [16] H. Liu, Y.-F. F. Lin, A. J. Stumpf, P. Kumar, y S. Sargent, «Spatial and temporal pattern monitoring on groundwater and surface water interactions using fiber-optic distributed temperature sensing», presentado en GSA North-Central 2018 Annual Meeting, Iowa, 2018.
- [17] V. P. Kaandorp, P. J. Doornenbal, H. Kooi, H. Peter Broers, y P. G. B. de Louw, «Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions», *J. Hydrol. X*, vol. 3, p. 100031, abr. 2019.
- [18] Q. Sun, D. Liu, L. Xia, J. Wang, H. Liu, y P. Shum, «Experimental Demonstration of Multipoint Temperature Warning Sensor Using a Multichannel Matched Fiber Bragg Grating», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, n.º 11, pp. 933-935, jun. 2008.
- [19] Q. Wu, Y. Okabe, y J. Wo, «Fiber Sensor Based on Interferometer and Bragg Grating for Multiparameter Detection», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, n.º 12, pp. 1345-1348, jun. 2015.
- [20] A. L. Ricchiuti, D. Barrera, K. Nonaka, y S. Sales, «Temperature gradient sensor based on a long-fiber Bragg grating and time-frequency analysis», *Optics Letters*, vol. 39, n.º 19, pp. 5729-5731, oct. 2014.
- [21] C. A. Triana-Infante, M. Varón-Durán, y D. Pastor-Abellán, «Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs) para deformación y temperature», *Iteckne*, vol. 11, n.º 2, pp. 172-182, dic. 2014.
- [22] C. A. Triana Infante, «Diseño e implementación de un sensor óptico basado en redes de difracción de Bragg», Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, colombia, 2012.
- [23] T. Erdogan, «Fiber grating spectra», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, n.º 8, pp. 1277–1294, ago. 1997.
- [24] G. Álvarez-Botero, F. E. Barón, C. C. Cano, O. Sosa, y M. Varón, «Optical Sensing Using Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications», *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 20, n.º 2, pp. 33-38, abr. 2017.
- [25] E. González Valencia, «REDES DE BRAGG EN FIBRAS ÓPTICAS MICROESTRUCTURADAS», Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.

- [26] R. Karshyap, *Fiber Bragg Gratings*, Primera. Londres: Academic Press, 1999.
- [27] G. P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Tercera. Estados unidos de America: Academic Press, 2001.
- [28] S. Yang, D. Hu, y A. Wang, «Point-by-point fabrication and characterization of sapphire fiber Bragg gratings», *Optics Letters*, vol. 42, n.º 20, pp. 4219-4222, oct. 2017.
- [29] M. Melo y P. V. S. Marques, «Fabrication of Tailored Bragg Gratings by the Phase Mask Dithering/Moving Technique», *Photonic Sensors*, vol. 3, n.º 1, pp. 81–96, nov. 2012.
- [30] F. T. S. Yu y S. Yin, *Fiber Optic Sensors*, Primera. New York: CRC Press, 2002.
- [31] A. Othonos y K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Primera. Londres: Artech House, Inc, 1999.
- [32] D. Kumar Mahanta, «Design of Uniform Fiber Bragg grating using Transfer matrix method», *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 3, n.º 1, pp. 8-13, may 2013.
- [33] J. Singh, A. Khare, y S. Kumar, «Design of Gaussian Apodized Fiber Bragg Grating and its applications», *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, n.º 5, pp. 1419-1424, jun. 2010.
- [34] E. Gemzický y J. Müllerová, «Apodized and chirped fiber Bragg gratings for optical communication systems: Influence of grating profile on spectral reflectance», presentado en Proceedings of SPIE, Praga, Republica checa, 2008, vol. 7138.
- [35] E. A. Frolov *et al.*, «Inscription and visualization of tilted fiber Bragg gratings», *Optics and Spectroscopy*, vol. 125, n.º 1, pp. 54-59, jul. 2018.
- [36] A. Ferreira da Silva, A. F. Gonçalves, L. A. de Almeida Ferreira, F. M. Moita Araújo, P. Mateus Mendes, y J. Higinio Correia, «A Smart Skin PVC Foil Based on FBG Sensors for Monitoring Strain and Temperature», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n.º 7, pp. 2728-2735, jul. 2011.
- [37] M. R. Mokhtar, T. Sun, y K. T. V. Grattan, «Bragg Grating Packages With Nonuniform Dimensions for Strain and Temperature Sensing», *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, n.º 1, pp. 139-144, ene. 2012.
- [38] M. Venkata Reddy, R. L. N. Sai Prasad, K. Srimannarayana, M. Manohar, y T. V. Apparao, «FBG-based temperature sensor package», presentado en 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Gwalior, India, 2014.
- [39] V. R. Mamidi, K. Srimannarayana, L. Ravinuthala, T. Venkatappa Rao, y V. R. Pachava, «Characterization of Encapsulating Materials for Fiber Bragg Grating-Based Temperature Sensors», *Fiber and Integrated Optics*, vol. 33, n.º 4, pp. 325-335, jul. 2014.
- [40] X. Jie, L. Zhi-bin, H. Qi-tao, y L. Chang, «A New Packaged FBG Sensor For Underground Cable Temperature Monitoring», presentado en IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2017.



- [41] L. Wang, Y. Wang, y F. Li, «Fiber temperature-depth profile measurement system application in the North Yellow Sea», presentado en Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, China, 2018.
- [42] J. Wei, Y. Hao, Y. Fu, L. Yang, G. Jiulin, y Z. Yang, «Detection of Glaze Icing Load and Temperature of Composite Insulators Using Fiber Bragg Grating», *Sensors*, vol. 19, n.º 1321, pp. 1-15, mar. 2019.
- [43] Technica Optical Components, «Datasheet - T20 / Polyimide Coated FBG to 300°C». [En línea]. Disponible en: <https://technicasa.com/t20-polyimide-coated-fbg-to-300c/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [44] Micron Optics, «Datasheet - Non-Metallic Temperature Sensor - os4300». [En línea]. Disponible en: <http://www.micronoptics.com/product/non-metallic-temperature-sensor-os4300/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [45] Technica Optical Components, «Datasheet - T830 / In-Line Temperature Sensor». [En línea]. Disponible en: <https://technicasa.com/t830-in-line-temperature-sensor/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [46] Micron Optics, «Datasheet - Distributed Temperature Sensing Cable». [En línea]. Disponible en: <http://www.micronoptics.com/product/distributed-strain-temperature-cable/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [47] G. Rajan, *OPTICAL FIBER SENSORS: Advanced Techniques and Applications*, Primera. Oakville, Canada: CRC Press, 2015.
- [48] J. E. Alfonso, L. G. Cárdenas, C. A. Triana, y M. Varón Durán, «Design of an optical sensing interrogator using an edge filter scheme», presentado en 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), Rio de Janeiro, Brazil, 2013, pp. 1-5.
- [49] J. S. Roncancio, N. González, C. C. Cano, y M. Varón, «Low cost optical interrogation system based on FBG sensors», presentado en 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Porto de Galinhas, Brazil, 2015, pp. 1-5.
- [50] W. Zhang, Y. Li, B. Jin, F. Ren, H. Wang, y W. Dai, «A Fiber Bragg Grating Interrogation System with Self-Adaption Threshold Peak Detection Algorithm», *Sensors*, vol. 18, n.º 4, p. 1140, abr. 2018.
- [51] S. C. Mukhopadhyay, *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Primera. Alemania: Springer, 2011.
- [52] Micron Optics, «Datasheet - Static Optical Sensing Interrogator | sm125». [En línea]. Disponible en: <http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2017/03/sm125.pdf>. [Accedido: 10-abr-2018].
- [53] A. Soriano Rull y J. Pancorbo, *Suministro, distribución y evacuación interior de agua sanitaria*, Primera. Barcelona: Marcombo, 2012.